



**Sérgio Miguel Cordeiro Rita**

Licenciatura em Ciências de Engenharia Civil

## **Caracterização de estruturas coerentes em leitos vegetados**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca, Prof. Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira  
Nunes Antão

Arguente: Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento  
Leal



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro, 2013**



### **Caracterização de estruturas coerentes em leitos vegetados.**

Copyright © Sérgio Miguel Cordeiro Rita, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Este estudo foi realizado no rio Anços, na freguesia de Redinha, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia sob a orientação do Professor Mário Franca da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Mário Franca pela liderança, paciência e objectividade que demonstrou ao longo da realização desta dissertação. A sua orientação e capacidade de partilhar conhecimentos de uma forma bastante clara foram absolutamente fundamentais durante a elaboração deste trabalho. Agradeço ainda a oportunidade de me integrar neste projecto.

Ao Bruno Oliveira Santos um agradecimento especial, pela companhia e auxílio durante o ensaio de campo e escrita desta dissertação. Agradeço também todos os conhecimentos transmitidos e ajuda no trabalho em MatLab. A sua alegria, capacidade de trabalho, entusiasmo e perfeccionismo foram uma inspiração positiva ao longo da realização deste estudo.

À Silvia Saggiori agradeço a orientação e companhia durante os ensaios realizados no rio Anços. Os seus conhecimentos foram imprescindíveis na primeira fase desta dissertação. Agradeço também toda a ajuda na programação em MatLab.

À população de Arrancada agradeço todo o auxílio e companhia durante os ensaios, particularmente à D. Maria do Céu pela generosidade de emprestar a chave da garagem durante uma semana a 3 desconhecidos de forma a poderem guardar a estrutura metálica durante a noite.

A todos os meus amigos por serem um apoio e nunca deixarem de me incentivar ao longo do percurso académico. Não vou estar a particularizar senão esta dissertação teria 10 páginas de agradecimentos.

À Joana por todo o amor e confiança. Não escrevo mais senão esta dissertação teria 100 páginas de agradecimentos.

Agradeço à minha família, em particular aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio, motivação e exemplo que sempre demonstraram ser. Sem vocês não seria possível chegar até aqui.

Finalmente, agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT, através do projeto PTDC/ECM/09975272008 e do *European Fund for Economic and Regional Development (FEDER)* através do *Program Operational Factor of Competitiveness (COMPETE)* FCOMP 01 0124 FEDER 009735.

# Resumo

A caracterização de estruturas coerentes num escoamento com leito vegetado continua a ser um desafio devido à imprevisibilidade dos fenómenos envolvidos. A crescente importância da preservação do meio ambiente levou a que fossem procuradas novas soluções para obras de engenharia como modelação de paisagens e restauração fluvial ou problemas como cheias e dispersão de poluição.

Através desta dissertação pretende-se caracterizar estruturas coerentes para um escoamento com superfície livre com e sem vegetação. Foram realizados dez ensaios de campo sendo escolhidos dois perfis. Para medir as velocidades instantâneas usou-se um velocímetro acústico doppler. Foi efectuada uma filtragem dos dados, de modo a serem usados apenas aqueles considerados úteis. A partir desta filtragem foi calculado o ângulo de correcção, velocidades médias, tensões de Reynolds e efectuada uma análise de eventos.

Os resultados obtidos permitem concluir que a tensão normal de Reynolds é consistente com a distribuição da velocidade longitudinal para ambos os perfis analisados, no entanto, no que diz respeito à tensão tangencial de Reynolds, essa consistência apenas se verifica para o perfil situado na vegetação.

Esta dissertação utilizou dados dispostos segundo um plano horizontal ao escoamento. Os eventos foram identificados consoante o quadrante em que se verificam. Com base nesta designação, foi possível observar que, de uma forma geral, os quadrantes que mais contribuem para o aparecimento de estruturas coerentes são o primeiro e terceiro, ao contrário do que se verifica na análise de eventos para um plano vertical ao escoamento. Pode-se assim concluir que a contribuição dos quadrantes na análise de eventos está dependente do plano onde se faz a análise dos mesmos (vertical ou horizontal).

**Palavras-chave:** Vegetação emersa flexível, ADV, estruturas coerentes, tensão de Reynolds, análise de quadrantes.

# Abstract

The characterization of coherent structures in a vegetated flow continues to be a challenge due to the unpredictability of the phenomena involved. The growing importance of the environment preservation led to being researched new solutions to engineering works like modeling landscapes and river restoration or problems like floods and pollution dispersion.

The objective of this dissertation is to characterize the difference between free-surface flow with and without vegetation. Ten profiles were tested, and two of them were chosen. In order to measure instantaneous velocities it was used an acoustic doppler velocimetry profiler. Data treatment was done in order to use only those considered valid. From this treatment it was calculated the correction angle, mean velocities, Reynolds stress and it was made a quadrant threshold analysis.

The results allow to conclude that Reynolds normal stress is consistent with the distribution of the mean longitudinal velocity for both profiles analysed. However, regarding Reynolds shear stress, this consistency is only verified for the profile in the vegetation.

This thesis worked with data distributed in a horizontal layout to the flow. The events were identified regarding the quadrant in which they appear. Based on this identification it was possible to observe that, in a general way, the quadrants that contribute more for the appearance of coherent structures are the first and the third, unlike what it is verified for a vertical layout to the flow. It is possible to conclude that the contribution of the quadrants in the quadrant threshold analysis is dependent of the layout (vertical or horizontal).

**Keywords:** Emerged flexible vegetation, ADV, coherent structures, Reynolds stress, quadrant threshold analysis.



# Índice de Capítulos

<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 – Enquadramento.....	1
1.2 – Objectivo.....	1
1.3 – Metodologia.....	2
1.4 – Organização da Dissertação.....	2
 <b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....</b>	 <b>3</b>
2.1 – Escoamento turbulento em rios com vegetação.....	3
2.2 – Estruturas coerentes.....	4
2.3 – Fenómeno bursting.....	4
2.4 – Filtragem de dados.....	7
2.4.1 – Detecção de picos.....	7
2.4.2 – Método de fronteira fase-espço e substituição de valores..	8
2.5 – Velocidades de escoamento sem e com vegetação.....	9
2.6 – Equações de Reynolds – Averaged Navier-Stokes (RANS).....	10
2.7 – Análise de Quadrantes.....	12
 <b>Capítulo 3 – Medições no Terreno.....</b>	 <b>15</b>
3.1 – Caracterização do rio.....	15
3.2 – Instrumentação.....	17
3.3 – Medições no terreno.....	18

<b>Capítulo 4 – Tratamento de dados.....</b>	<b>21</b>
4.1 – Introdução.....	21
4.2 – Filtragem de dados.....	21
4.3 – Ângulo de correcção.....	30
4.4 – Velocidades médias no tempo.....	30
4.5 – Tensão de Reynolds – VM.....	32
4.6 – Tensão de Reynolds – VMTA.....	35
4.7 – Análise de Quadrantes.....	36
 <b>Capítulo 5 – Resultados.....</b>	 <b>39</b>
5.1 – Filtragem de dados.....	39
5.1.1 – Perfil 1 – Resultados iniciais.....	40
5.1.2 – Perfil 1 – Resultados finais.....	41
5.1.2.1 – Direcção longitudinal.....	41
5.1.2.2 – Direcção transversal.....	44
5.1.3 – Perfil 7 – Resultados iniciais.....	46
5.1.4 – Perfil 7 – Resultados finais.....	50
5.1.4.1 – Direcção longitudinal.....	50
5.1.4.2 – Direcção transversal.....	52
5.2 – Ângulo de correcção.....	53
5.3 – Velocidades medias.....	54
5.3.1 – Direcção longitudinal.....	54
5.3.2 – Direcção transversal.....	56
5.4 – Tensão de Reynolds.....	58

5.4.1 – Perfil 1.....	58
5.4.2 – Perfil 7.....	60
5.5 – Análise de Quadrantes.....	62
5.5.1 – Perfil 1 – VM.....	62
5.5.2 – Perfil 1 – VMTA.....	64
5.5.3 – Perfil 7 – VM.....	66
5.5.4 – Perfil 7 – VMTA.....	68
 <b>Capítulo 6 – Conclusões e trabalho futuro.....</b>	<b>71</b>
 <b>Bibliografia.....</b>	<b>75</b>
 <b>Anexo I.....</b>	<b>77</b>
 <b>Anexo II.....</b>	<b>79</b>



## Índice de Tabelas

2.1: Métodos propostos para detecção do fenómeno bursting (traduzido de Nezu & Nakagawa 1993).....	5
2.2: Descrição dos eventos do fenómeno bursting por quadrante.....	12
3.1: Descrição dos perfis ensaiados (Saggiori et al 2011).....	19
3.2: Análise segundo z/h para cada posição de todos os Perfis ensaiados.....	20
4.1: Filtragem de dados – Perfil 1 – $u(t)$ .....	23
4.2: Filtragem de dados – Perfil 1 – $v(t)$ .....	23
4.3: Filtragem de dados – Perfil 7 – $u(t)$ .....	24
4.4: Filtragem de dados – Perfil 7 – $v(t)$ .....	25
4.5: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 1 – $u(t)$ .....	26
4.6: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 1 – $v(t)$ .....	27
4.7: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 7 – $u(t)$ .....	28
4.8: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 7 – $v(t)$ .....	29
4.9: Exemplo do intervalo de dados comuns para o Perfil 1, Posição 1.....	33
4.10: Intervalos de dados comuns segundo ambas as direcções e a sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 7.....	34
5.1: Velocidades médias longitudinais – Perfil 1 e Perfil 7.....	54
5.2: Velocidades médias transversais – Perfil 1 e Perfil 7.....	56
5.3: Valor de Tensões de Reynolds ao longo do Perfil 1.....	58
5.4: Valor de Tensões de Reynolds ao longo do Perfil 7.....	60



## Índice de Figuras

2.1: Representação do em forma de ferradura devido a turbulência (Thedorsen 1955) e do modelo conceptual do ciclo do fenómeno bursting próximo do fundo (Wallace 1985).....	5
2.2: Exemplo da distribuição vertical da velocidade longitudinal num escoamento quase uniforme com fronteira hidraulicamente lisa, ao longo das várias regiões em que se divide a coluna de água (Ricardo, A.M.C., 2008).....	8
2.3: Série temporal de velocidades instantâneas ( $u(t)$ ) num intervalo de tempo ( $t$ ) representando o valor médio e as flutuações instantâneas (Dados de Ferreira (2005, Capítulo 2)).....	11
2.4: Divisão esquemática dos eventos bursting incluindo um valor de fronteira $H'$ (Nezu & Nakagawa 1993).....	13
3.1: Identificação no mapa do local onde foram efectuados os ensaios.....	15
3.2: Perspectiva do local dos ensaios a partir da nascente do rio.....	16
3.3: Comporta que condiciona o caudal do rio.....	16
3.4: Vegetação encontrada no rio Anços.....	17
3.5: Nortek ADV-Vectrino <sup>TM</sup> .....	17
3.6: Montagem e nivelamento da estrutura metálica.....	18
3.7: Localização dos dez perfis ensaiados (Saggiori et al 2011).....	19
4.1: Comparação do sentido e influência das velocidades instantâneas segundo a direcção longitudinal e transversal.....	31
5.1: Perfil 1, Posição 1 – Direcção longitudinal e transversal – Filtragem inicial de dados.....	40
5.2: Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 1, 2, 3 e 4.....	41
5.3: Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 5, 6, 7 e 8.....	42

5.4: Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 9, 10, 11 e 12.....	43
5.5: Velocidade transversal – comparação entre $v(t)$ inicial e $v(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 1, 2, 3 e 4.....	44
5.6: Velocidade transversal – comparação entre $v(t)$ inicial e $v(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 5, 6, 7 e 8.....	45
5.7: Velocidade transversal – comparação entre $v(t)$ inicial e $v(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 9, 10, 11 e 12.....	45
5.8: Perfil 7, Posição 2 e 3 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	47
5.9: Perfil 7, Posição 4 e 6 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	48
5.10: Perfil 7, Posição 7 e 8 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	49
5.11: Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 1, 2, 4 e 5.....	51
5.12: Velocidade transversal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 1, 2, 4 e 5.....	52
5.13: Comparação do ângulo de correcção entre o perfil 1 e perfil 7.....	53
5.14: Comparação da velocidade média longitudinal entre o Perfil 1 e o Perfil 7.....	55
5.15: Comparação da velocidade média transversal entre o Perfil 1 e o Perfil 7.....	57
5.16: Tensão de Reynolds ao longo do Perfil 1.....	59
5.17: Tensão de Reynolds ao longo do Perfil 7.....	61
5.18: Análise de Eventos (VM) – Perfil 1 – Posições 1 a 4.....	62
5.19: Análise de Eventos (VM) – Perfil 1 – Posições 5 a 8.....	63
5.20: Análise de Eventos (VM) – Perfil 1 – Posições 9 a 12.....	63



5.21: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 1 – Posições 1 a 4.....	64
5.22: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 1 – Posições 5 a 8.....	65
5.23: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 1 – Posições 9 a 12.....	65
5.24: Análise de Eventos (VM) – Perfil 7 – Posição 1,2,4 e 5.....	66
5.25: Análise de Eventos (VM) – Perfil 7 – Posição 6,7,8 e 9.....	67
5.26: Análise de Eventos (VM) – Perfil 7 – Posição 10,12,14 e 16.....	67
5.27: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 7 – Posições 1,2,4 e 5.....	68
5.28: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 7 – Posições 6,7,8 e 9.....	69
5.29: Análise de Eventos (VMTA) – Perfil 7 – Posições 10,12,14 e 16.....	69

## Figuras em Anexos

Perfil 7, Posição 9 e 10 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	77
Perfil 7, Posição 11 e 12 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	77
Perfil 7, Posição 13 e 14 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	78
Perfil 7, Posição 15 e 16 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados.....	78
Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 6, 7, 8 e 9.....	79
Velocidade longitudinal – comparação entre $u(t)$ inicial e $u(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 10, 12, 14 e 16.....	79
Velocidade transversal – comparação entre $v(t)$ inicial e $v(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 6, 7, 8 e 9.....	80
Velocidade transversal – comparação entre $v(t)$ inicial e $v(t)$ após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 10, 12, 14 e 16.....	80



## Simbologia

Símbolo	Descrição	Dimensão
$q$	Média de uma amostra proveniente de um sinal arbitrário	$[LT^{-1}]$
$x$	Distância longitudinal	$[L]$
$y$	Distância transversal	$[L]$
$z$	Distância vertical	$[L]$
$t$	Intervalo de tempo	$[T]$
$T$	Período	$[T]$
$u'$	Desvio padrão da velocidade longitudinal	$[LT^{-1}]$
$v'$	Desvio padrão da velocidade transversal	$[LT^{-1}]$
$\theta$	Ângulo de rotação segundo o eixo principal	$[Rad.]$
$n$	Número de dados	$[-]$
$\lambda u$	Valor de fronteira definido no método de fronteira fase- espaço para a direcção longitudinal	$[LT^{-1}]$
$\lambda v$	Valor de fronteira definido no método de fronteira fase- espaço para a direcção transversal	$[LT^{-1}]$
$u$	Componente da velocidade na direcção longitudinal	$[LT^{-1}]$
$v$	Componente da velocidade na direcção transversal	$[LT^{-1}]$
$w$	Componente da velocidade na direcção vertical	$[LT^{-1}]$
$h$	Altura do escoamento	$[L]$
$g$	Módulo da aceleração gravítica	$[LT^{-2}]$
$p$	Pressão do fluido	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\overline{u'.u'}$	Tensão normal de Reynolds	$[L^2T^{-2}]$
$\overline{u'.v'}$	Tensão tangencial de Reynolds	$[L^2T^{-2}]$
$ \bar{u} $	Módulo da velocidade média longitudinal	$[LT^{-1}]$
$ \bar{v} $	Módulo da velocidade média transversal	$[LT^{-1}]$
$\bar{u}$	Velocidade média longitudinal	$[LT^{-1}]$
$\bar{v}$	Velocidade média transversal	$[LT^{-1}]$
$d$	Diâmetro das plantas	$[L]$
$H$	Tamanho do buraco	$[-]$

$u_{rms}$	Turbulência associada à velocidade longitudinal	[LT <sup>-1</sup> ]
$v_{rms}$	Turbulência associada à velocidade transversal	[LT <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Massa volúmica da água	[ML <sup>-3</sup> ]

## Acrónimos e abreviações

Acrónimo	Descrição
ADV	Acoustic Doppler Velocimetry (Velocímetro acústico Doppler)
RANS	Equações de Navier-Stokes médias no tempo
GN	Goring - Nikora
VM	Velocidade média longitudinal ou transversal
VMTA	Velocidade média transversal absoluta
SI	Sistema Internacional



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Enquadramento

A caracterização de um escoamento turbulento continua a ser um desafio devido à natureza dos fenómenos envolvidos. A presença de vegetação aumenta a complexidade do problema, na medida em que vai originar a presença de forças junto ao leito, caule e folhas. A correcta identificação destas forças pode ajudar na prevenção de determinados problemas de engenharia, como cálculo do nível de cheias, avaliação da difusão e dispersão de poluição ou restauração fluvial.

Esta dissertação enquadra-se no projecto PTDC/ECM/099752/2008 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

### 1.2 – Objectivo

- Efectuar uma análise dos eventos que compõem o fenómeno bursting;
- Comparação dos mesmos em zona sem e com vegetação.

### **1.3 – Metodologia**

O trabalho experimental consiste na medição de velocidades de escoamento recorrendo a medições ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) ao longo de dez perfis. Foi efectuada uma análise prévia das características físicas do local, nomeadamente, profundidade, tipo de vegetação existente e topografia do leito.

Neste trabalho serão analisados dois dos dez perfis, um sem vegetação e outro com vegetação. Com base nos dados recolhidos no ADV é efectuada uma filtragem dos mesmos, até se determinar um conjunto de dados considerados fiáveis. Os valores obtidos de velocidades médias, tensões de Reynolds e análise de quadrantes para cada um dos dois perfis são comparados entre si.

### **1.4 – Organização da dissertação**

A dissertação é composta por 6 capítulos, estando organizada da seguinte forma:

- Capítulo 2: Revisão teórica sobre escoamento turbulento com e sem vegetação, definição de estruturas coerentes, fenómeno bursting, filtragem de dados, análise de eventos, equações de Reynolds.
- Capítulo 3: Descrição detalhada do local, equipamentos utilizados e medições efectuadas no trabalho experimental.
- Capítulo 4: Tratamento dos dados obtidos, nomeadamente, filtragem de dados, obtenção de velocidades médias longitudinais e transversais, tensões de Reynolds e análise de quadrantes.
- Capítulo 5: Resultados obtidos e discussão dos mesmos.
- Capítulo 6: Conclusões e propostas para trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### **2.1 – escoamento turbulento em rios com vegetação**

Na prática, ou seja, na natureza, os escoamentos com superfície livre são na sua esmagadora maioria turbulentos. A turbulência é influenciada principalmente pela viscosidade (resistência do escoamento ao escoamento), pois quanto menor a viscosidade, maior a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, maior a probabilidade de ocorrerem fenômenos de turbulência.

A introdução de uma barreira física, como é o caso da vegetação, provoca um aumento de resistência hidráulica (Kadlec 1990, Yen 2002 e Tanino & Nepf 2008). A vegetação pode ser caracterizada, do ponto de vista da análise de estruturas, como tendo vários graus de liberdade ao longo do caule e folhas. Estes graus de liberdade dão origem a momentos de segunda e terceira ordem que influenciam o transporte de poluentes e difusão.

A medição da velocidade de escoamento num rio é um processo mais difícil do que num ambiente laboratorial, pois as condições de fronteira são mais complicadas e o caudal transporta consigo diversos tipos de sedimentos (Nezu & Nakagawa 1993). O estudo da interação entre plantas e escoamento é feito principalmente em ambiente laboratorial dentro de condições controladas (por exemplo, Lory 2011), no entanto, nos últimos anos o número de ensaios efectuados em rios aumentou consideravelmente, tanto para rios sem vegetação (Lacey & Roy, 2007 e Franca et al., 2008), como para rios com vegetação (Miler et al., 2011 e Sukhodolova & Sukhodolov, 2012).

## **2.2 – Estruturas coerentes**

“Uma estrutura coerente consiste numa parcela de um escoamento em forma de redemoinho que ocupa uma região espacial confinada, de tal modo que é mantida uma relação entre as variáveis do escoamento e os seus componentes ao longo do tempo e espaço.”(Blackwelder 1987).

Ou seja, apesar da imprevisibilidade do fenómeno turbulência, as suas componentes não são independentemente aleatórias, existem parcelas de escoamento no escoamento que contêm uma organização espaço-temporal tal como se detivessem um ciclo de vida (Nezu & Nakagawa 1993).

## **2.3 – Fenómeno bursting**

Um conjunto de investigadores concluiu que existe uma subcamada viscosa composta por movimentos coerentes e organizados cujo aparecimento e final ocorrem periodicamente. O fenómeno designado por bursting foi descoberto por Kline et al. (1967) e Kim et al. (1971) (Nezu & Nakagawa 1993).

Através da técnica de visualização da bolha de hidrogénio (consiste em gerar bolhas de hidrogénio através de electrólise, bolhas essas que possibilitam a identificação das perturbações do escoamento), Kline et al. (1967) descobriu que esta subcamada consiste em correntes de alta e baixa velocidade com espaçamento relativamente regular. O fenómeno bursting consiste na seguinte sequência: elevar, oscilar, ejectar e varrer. As correntes lentas vão sendo gradualmente afastadas do fundo, começam a oscilar até finalmente serem ejectadas. Corino & Brodkley (1969) identificaram correntes rápidas que varrem o escoamento remanescente (Nezu & Nakagawa 1993).

Através da velocidade instantânea sabe-se que perfis verticais com inflexões estão associados com o fenómeno bursting. Kim et al. (1971) descobriram que a energia turbulenta e a tensão de Reynolds eram geradas devido ao fenómeno bursting (especialmente ejeções e varrimento).

Actualmente, o modelo mais plausível usado na representação do fenómeno “bursting” é um vortex em forma de ferradura de cavalo, modelo este proposto por Theodorsen (1955) e desenvolvido por Wallace (1985) (Figura 2.1) com base em novos dados que Theodorsen não tinha disponíveis (Nezu & Nakagawa 1993).

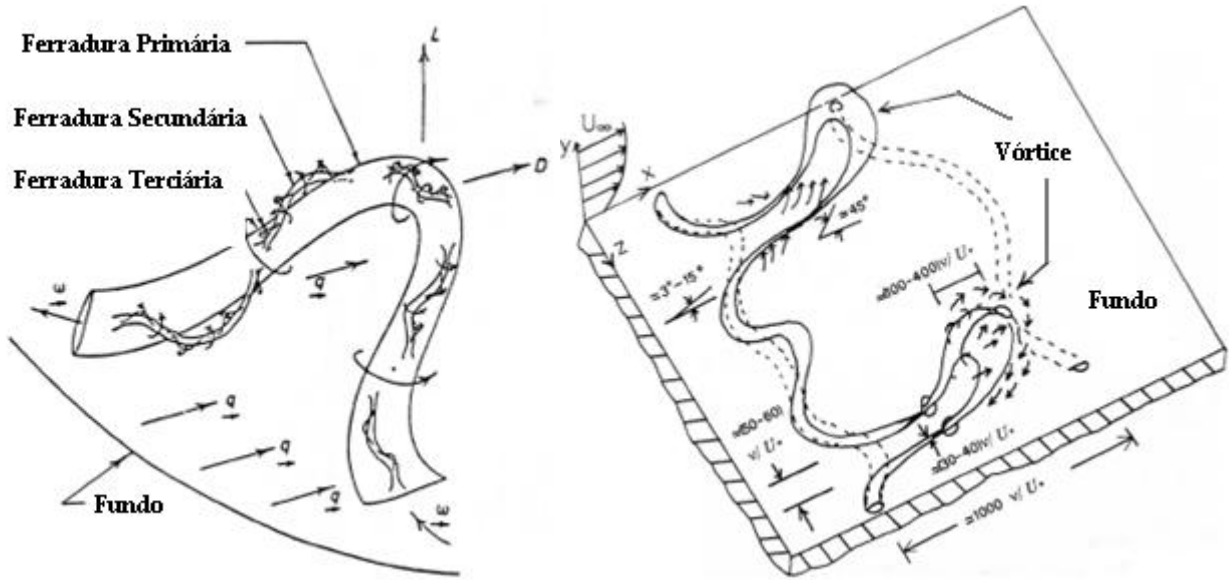


Figura 2.1: Representação do em forma de ferradura devido a turbulência (Theodorsen 1955) e do modelo conceptual do ciclo do fenómeno bursting próximo do fundo (Wallace 1985) in Nezu & Nakagawa 1993.

Para se detectar estruturas coerentes em medições de velocidade instantâneas é necessário, antes de mais, saber quais as características de estruturas coerentes dentro de um escoamento. Só depois de se ter a certeza que a informação é significativa é que se aplica o procedimento de tratamento de dados. De uma forma geral, a média de uma amostra proveniente de um sinal arbitrário  $q(x_1, y_1, z_1, t + \tau)$  pode ser definida por:

$$q(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau) = \frac{\int_T q(x_1, y_1, z_1, t + \tau) \times I(x_0, y_0, z_0, t) dt}{\int_T I(x_0, y_0, z_0, t) dt} \quad (2.1)$$

onde  $(x_0, y_0, z_0)$  é o local onde é colocada a sonda de detecção; a distância entre a sonda e a amostra é calculada através de  $\Delta x = x_1 - x_0, \Delta y = y_1 - y_0, \Delta z = z_0 - z_1$  e  $\tau$  é o intervalo de tempo.

O parâmetro  $T$  no integral implica uma duração média pré-determinada. A função  $I(x_0, y_0, z_0, t)$  selecciona o movimento coerente em questão num determinado tempo e coordenadas. No entanto, uma função de detecção  $I$  que permita detectar movimentos bursting ainda não está estabelecida apesar de existirem diversas propostas por vários investigadores (Nezu & Nakagawa 1993) (Tabela 2.1). A dificuldade em estabelecer uma função de detecção está relacionada com o carácter aleatório do fenómeno bursting.

Tabela 2.1: Métodos propostos para detecção do fenómeno bursting (traduzido de Nezu & Nakagawa 1993).

Método	Investigadores	Sinais de detecção	Propriedades avaliadas	Parâmetros arbitrários	Comentários
Band-pass-filter threshold	Rao et al. (1971), Ueda & Hinze (1975)	$u(t)$	Período <i>bursting</i>	Valor de filtragem e de limite	Escolha de parâmetros não é necessariamente racional
Second-mild maximum	Kimet al. (1971)	$u(t)$	Período <i>bursting</i>	Médias da avaliação temporal ( $T$ )	Caso $T$ seja demasiado elevado, o segundo mild-maximum desaparece
$u$ - $v$ quadrant threshold	Lu & Willmarth (1973), Nakagawa & Nezu (1977)	$u(t)$ e $v(t)$	Período <i>bursting</i> e estruturas	Hole size " $H$ "	Nenhum platô para $T_B$ vs $H$
$u$ - $v$ quadrant and $uv$ weighted average	Nakagawa & Nezu (1981)	$u(t)$ e $v(t)$	Estruturas <i>bursting</i>	Nenhum	$T_B$ não pode ser avaliado
VITA	Blackwelder & Kaplan (1976)	$u(t)$	Estruturas <i>bursting</i>	Tempo ( $T$ ) e limite ( $k$ )	Nenhum platô para $T_B$ vs $H$ e $k$
Pathern-recognition	Wallace et al. (1977)	$u(t)$	Estruturas <i>bursting</i>	Valor de filtro e fase de $\delta u/\delta t$	Não é possível ser feita uma avaliação em tempo real de estruturas bursting

## 2.4 – Filtragem de dados

Velocímetros acústicos Doppler tornaram-se os equipamentos escolhidos na medição de velocidade em estruturas ecológicas exteriores assim como em laboratório (Nikora et al. 2001). As medições de velocidade obtidas através do uso de um Doppler costumam ter alguns problemas, proveniente da falta de partículas flutuantes ou mesmo devido a factores externos (por exemplo, quando um obstáculo passa em frente ao doppler, como uma folha, originando distorção).

Consequentemente é registada uma velocidade diferente da velocidade do escoamento o que se traduz em picos na recolha de dados. O objectivo é encontrar um método que permite detectar os picos e lidar com eles. A solução encontrada engloba um conjunto de várias ideias.

### 2.4.1 – Detecção de picos

Uma das soluções consiste num algoritmo que identifica os picos com base no valor da aceleração. Em teoria, a aceleração de um escoamento em condições normais deve ser igual à aceleração da gravidade caso contrário os sedimentos seriam atirados violentamente, o que é contrário às observações (Nikora 2000). Após correr o algoritmo, os picos são identificados caso a aceleração seja superior a uma ou duas gravidades.

Porém, este critério provou-se demasiado rigoroso pois alguns pontos válidos seriam considerados como picos (Goring & Nikora 2002). Desta forma, foi incluída uma nova condição para um ponto ser considerado como pico: A aceleração deve ser superior a um valor de fronteira igual a  $\lambda_a g$  e o desvio absoluto da velocidade média de cada ponto deve ser superior a  $k\sigma$  (Goring & Nikora 2002) (onde  $\lambda_a$  é um valor de fronteira para a aceleração,  $\sigma$  é o desvio médio e  $k$  é um factor). Nesta situação o problema situa-se na escolha do valor de fronteira, que pode ser bastante difícil e subjectivo para alguns casos.

## 2.4.2 – Método de fronteira fase-espço e substituição de valores

Os pontos devem estar dentro de uma elipse definida pelo critério universal, ou seja, uma condição de fronteira e qualquer ponto que esteja situado fora da elipse é considerado um pico. Obtém-se assim uma elipse que contém os valores de velocidade, sendo que os pontos projectados fora da elipse devem ser identificados e substituídos. Este método procede a várias iterações até que os dados sejam considerados constantes, onde cada iteração obedece aos seguintes passos:

a) Calcular substitutos para a primeira e segunda derivada;

$$\Delta u_i = \frac{(u_{i+1} - u_{i-1})}{2} \quad (2.4)$$

$$\Delta^2 u_i = \frac{(\Delta u_{i+1} - \Delta u_{i-1})}{2} \quad (2.5)$$

b) Calcular o desvio padrão das variáveis  $\sigma_u$ ,  $\sigma_{\Delta u}$ ,  $\sigma_{\Delta^2 u}$  e o seu máximo através do critério universal;

$$\lambda_u \times \sigma = \sqrt{2 \ln(n)} \sigma \quad (2.6)$$

onde  $\lambda_u$  é o valor de fronteira,  $n$  o número de variáveis e  $\sigma$  o desvio padrão;

c) Calcular o ângulo de rotação do principal eixo de  $\Delta^2 u_i$  comparativamente a  $u_i$  através da seguinte relação;

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right) \quad (2.7)$$

d) Definir uma elipse para uma das 3 variáveis, de modo a se obter o valor máximo e mínimo do conjunto das 3 elipses. Para  $\Delta u_i$  versus  $u_i$  o eixo maior é  $\lambda_u \sigma_u$  e o eixo menor é  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$ . Para  $\Delta^2 u_i$  versus  $\Delta u_i$  o eixo maior é  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$  e o eixo menor é  $\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u}$ . Para  $\Delta^2 u_i$  vs  $u_i$ , o eixo maior e menor,  $a$  e  $b$ , respectivamente, podem ser obtidos através de;

$$(\lambda_u \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \quad (2.8)$$

$$(\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \quad (2.9)$$

O objectivo deste método passa por, em cada iteração, reduzir o desvio padrão obtido no passo b), diminuindo assim o tamanho da elipse, até que não

seja necessário substituir quaisquer valores considerados excessivos. A substituição dos valores pode ser feita através de extrapolação com base nos dados anteriores; usando o valor médio das velocidades instantâneas; atribuir uma estimativa ou interpolar entre os extremos dos valores de pico.

## 2.5 – Velocidades de escoamento sem e com vegetação

Ao se analisar a distribuição da velocidade para um perfil vertical em leito com superfície livre sem vegetação é possível identificar 3 regiões: i) junto ao leito do rio; ii) junto à superfície livre; iii) região intermédia.

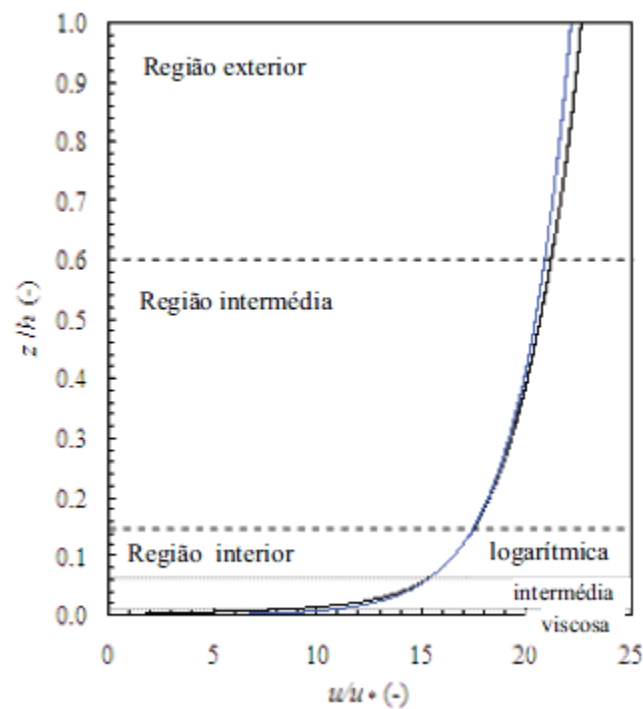


Figura 2.2: Exemplo da distribuição vertical da velocidade longitudinal num escoamento quase uniforme com fronteira hidraulicamente lisa, ao longo das várias regiões em que se divide a coluna de água (Ricardo, A.M.C., 2008).

No caso de um perfil vertical de um leito vegetado a distribuição da velocidade é afectada pela configuração e rugosidade do leito do rio, características do caule e folhas, superfície livre e propriedades do escoamento, podendo ser identificadas 4 diferentes regiões: i) junto ao leito do rio, controlada pela rugosidade e configuração do leito; ii) na vegetação, controlada

pela densidade de plantas existentes e características biológicas (caule e folhas); iii) camada limite, situada entre a região vegetada de baixas velocidades e a região superior do perfil; iv) junto à superfície livre onde as velocidades são mais elevadas (Raupach et al. 1996 e Nepf 2012).

## 2.6 – Equações de Reynolds – Averaged Navier-Stokes (RANS)

O ponto de partida para estudo de escoamentos turbulentos são as equações de Navier-Stokes (2.10) pois permitem obter todas as características dos campos de velocidade em escoamentos turbulentos. O sistema de coordenadas adoptado para este trabalho é definido pelas direcções  $(x, y, z)$  onde  $x$  assume a direcção longitudinal ao longo do escoamento,  $y$  a direcção transversal e  $z$  a direcção normal ao leito. As componentes da velocidade são, respectivamente,  $u$ ,  $v$  e  $w$ . As equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis são:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.10)$$

onde  $p$  é a pressão local do escoamento,  $u_i$  é a componente da velocidade na direcção  $i$  e  $g_i$  é a componente da aceleração gravítica na direcção  $i$ .

No entanto, o tempo necessário para resolver problemas de engenharia em todas as escalas possíveis (a ordem de grandeza do diâmetro das moléculas do escoamento é de  $10^{-10}$ ) podem ser meses, anos ou séculos (Pope 2000) o que inviabiliza a sua utilização. As equações de Navier-Stokes médias no tempo (Reynolds Averaged Navier-Stokes ou RANS) surgiram com o objectivo de tornar a equação descrita em (2.10) exequível.

Para se obter as RANS é necessário usar a decomposição de Reynolds (2.11) de modo a se obter um valor médio temporal e uma flutuação ao longo do tempo a partir das variáveis instantâneas do escoamento.



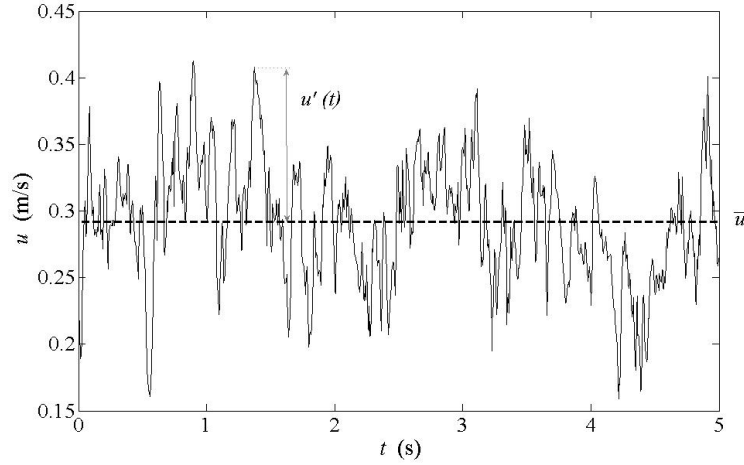


Figura 2.3: Série temporal de velocidades instantâneas ( $u(t)$ ) num intervalo de tempo ( $t$ ) representando o valor médio e as flutuações instantâneas (Dados de Ferreira (2005, Capítulo 2)).

$$\theta(x, y, z, t) = \overline{\theta}(x, y, z, t) + \theta'(x, y, z, t) \text{ em que } \overline{\theta'} = 0 \quad (2.11)$$

onde  $\overline{\theta}$  representa a média temporal e  $\theta'$  as flutuações temporais.

Após se aplicar a decomposição de Reynolds, incluindo o operador média temporal obtém-se as RANS (Pope 2000):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

Ao se comparar as equações (2.10) e (2.12) é possível concluir que a maioria dos termos das equações de Navier-Stokes foram substituídos pela respectiva média temporal das RANS. A exceção encontra-se no último termo da equação (2.12), o tensor das tensões de Reynolds definido por  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  que, para o escoamento médio, representa o efeito médio do transporte da quantidade de movimento pelas flutuações de velocidade.

As RANS são essenciais na modelação numérica e interpretação de resultados experimentais em escoamentos turbulentos, mas aplicam-se apenas a escoamento com fronteira lisa ou pouco irregular (Ricardo 2008).

Nos casos em que existe elevada heterogeneidade espacial estas equações não traduzem com rigor toda a complexidade do problema junto às fronteiras rugosas sendo necessário transformar as equações de Navier-Stokes não só por intermédio de médias temporais como também por médias espaciais (Nikora 2007).

## 2.7 – Análise de Quadrantes

Como foi referido no Capítulo 2.3, o fenómeno bursting pode ser caracterizado por uma determinada sequência de eventos: elevação, oscilação, ejeção e varrimento. Tendo em conta as características da velocidade longitudinal e vertical ( $u'$  e  $v'$ , respectivamente), os eventos encontram-se no quadrante respectivo (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Descrição dos eventos do fenómeno bursting por quadrante.

Quadrante		$u'$	$v'$
1º	Interacção direccionada para fora	$>0$	$>0$
2º	Ejecção	$<0$	$>0$
3º	Interacção direccionada para dentro	$<0$	$<0$
4º	Varrimento	$>0$	$<0$

O sinal instantâneo das tensões de Reynolds está relacionado com o fenómeno bursting e é usado para detectar características do seu movimento. Os movimentos de ejeção e varrimento contribuem bastante para a produção de turbulência, definindo  $I_e(t)$  para ejeções e  $I_v(t)$  para varrimento e para uma análise de quadrantes  $u-v$ , onde  $u(t)$  representa as velocidades horizontais e  $v(t)$  as velocidades verticais obtidas, tem-se:

$$I_e(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } u(t) < 0 \text{ e } v(t) > 0 \\ 0 & \text{para o oposto} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$I_v(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } u(t) > 0 \text{ e } v(t) < 0 \\ 0 & \text{para o oposto} \end{cases} \quad (2.3)$$

Infelizmente as funções de  $I_e(t)$  e  $I_v(t)$  não podem ser usadas como forma de detectar o fenómeno bursting pois os movimentos de ejeção e varrimento também possuem movimento de interacção (Nezu & Nakagawa 1993).

Um dos métodos usados na detecção do fenómeno bursting consiste na introdução de um valor de fronteira  $H'$  na análise de quadrantes  $u-v$ , segundo o qual ocorrem movimentos de ejeção ou varrimento. No entanto, esse valor de fronteira  $H'$  varia, não sendo possível encontrar um padrão que relaciona  $u-v$  com essa variância.

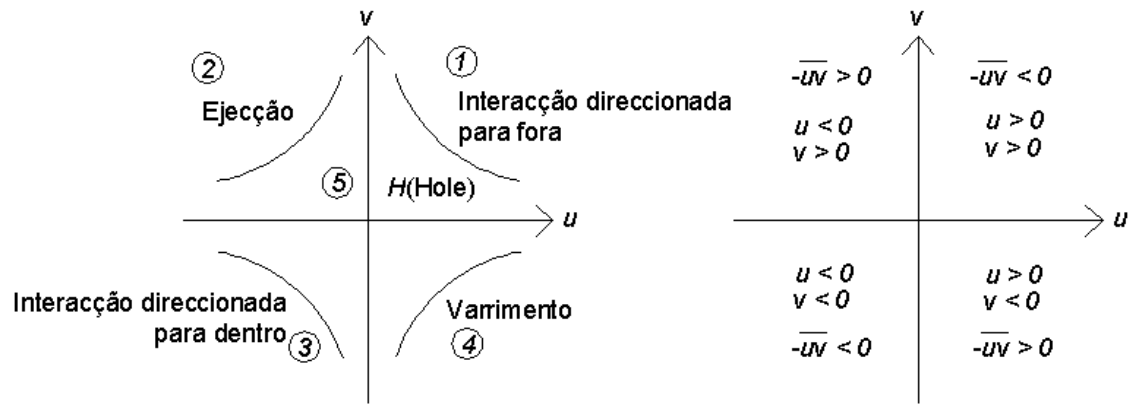


Figura 2.4: Divisão esquemática dos eventos bursting incluindo um valor de fronteira  $H'$  (baseado em Nezu & Nakagawa 1993).

Nezu & Nakagawa propuseram uma função de detecção que é influenciada directamente pelo valor instantâneo de tensão de Reynolds para ejeções e varrimento. Esta técnica implica que um valor instantâneo de tensão de Reynolds forte contribui mais para a estrutura média do fenómeno bursting, no entanto, não permite detectar movimentos de bursting individuais. Tem como vantagem o facto de não se introduzir qualquer parâmetro arbitrário e existe uma filtragem dos dados, na medida em que a turbulência é limpa, quando se compara com a média de um largo conjunto de dados.



# Capítulo 3

## Medições no terreno

### 3.1 – Caracterização do rio

As medições foram efectuadas no rio Anços, em Setembro de 2011, durante cinco dias. O local de medições situa-se em (+39°58'44.56"N, -8°34'25.35"W) junto à povoação de Arrancada, na freguesia de Redinha, concelho de Pombal. O rio Anços é um pequeno curso de água, alimentado por uma nascente em maciço cársico, tendo algumas derivações de modo a irrigar pequenos campos de cultivo.



Figura 3.1: Identificação no mapa do local onde foram efectuados os ensaios.

O local onde foram efectuados os ensaios tem um escoamento constante e regular, estando situado a cerca de 30 metros da nascente do rio e tendo cerca de 13 metros de distância entre margens (Figura 3.2). Na nascente a profundidade do rio era bastante baixa (inferior a 20 centímetros), aumentando para cerca de 50 centímetros junto a uma duna com 8 metros de comprimento. No final da duna/início da vegetação a profundidade do rio atingia quase 1 metro.



Figura 3.2: Perspectiva do local dos ensaios a partir da nascente do rio.

A temperatura da água situou-se sempre entre os 16º C e os 17º C. A profundidade da água era controlada de hora a hora, tendo variado devido à abertura de uma comporta (Figura 3.3) de modo a alimentar um canal usado para irrigação. Durante a realização dos ensaios a profundidade manteve-se praticamente constante (cerca de 50 centímetros na duna e cerca de 1 metro na vegetação).



Figura 3.3: Comporta que condiciona o caudal do rio.

Aquando da realização dos ensaios, a vegetação existente era alta e bastante densa, o diâmetro médio do caule existente era de 6 mm. Foram encontrados três tipos de vegetação (Figura 3.4): Tipo 1) *potamogeton nodosu*, Tipo 2) *myriophyllum alterniflorum* (ambos com 1.10 metros de altura) e Tipo 3) *rorippa nasturtium-aquaticum* com, aproximadamente, 0.60 metros de altura.



Figura 3.4: Vegetação encontrada no rio Anços.

### 3.2 – Instrumentação

O equipamento usado para as medições do terreno foi um 3-D Acoustic Doppler Velocimetry (Nortek ADV-Vectrino™). Este equipamento é constituído por quatro transmissores e um receptor situado no centro da sonda (Figura 3.5). A reflexão do sinal transmitido pelo ADV-Vectrino ocorre nas partículas flutuantes situadas a 5 centímetros da sonda. O aparelho foi calibrado de forma a permitir a obtenção de velocidades instantâneas entre os  $\pm 0,30$  m/s, tendo uma frequência de 100 Hz.



Figura 3.5: Nortek ADV-Vectrino™



O ADV-Vectrino foi fixado a uma estrutura metálica com  $175 \times 175 \text{ cm}^2$  de área na base e 167 cm de altura com a sonda disposta segundo o eixo longitudinal com a mesma direcção da corrente do rio (Figura 3.6). Os eixos de coordenadas foram definidos tendo como base o muro de alvenaria junto à margem direita do rio.

### 3.3 – Medições no terreno

A estrutura metálica que suporta o ADV-Vectrino teve de ter sempre a mesma orientação ao longo dos vários perfis analisados. Para isso foi usado uma referência de modo a se conseguir definir um eixo, sendo escolhido o muro de alvenaria como essa referência. A partir de equações trigonométricas definiu-se o eixo longitudinal do ADV-Vectrino de forma que fosse sempre paralelo com a margem direita do rio. Outro factor a ter em conta foi a nivelção da estrutura, sendo usado um nível de modo a se adaptar a altura de cada um dos quatros apoios da estrutura (Figura 3.6). Este trabalho foi efectuado para cada um dos perfis.



Figura 3.6: Montagem e nivelamento da estrutura metálica.



Tendo em conta as características do local e o objectivo do trabalho de campo, foi feito um planeamento prévio da localização dos perfis, de modo a se ter pelo menos um ensaio em zona sem vegetação, com vegetação e na fronteira (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Descrição dos perfis ensaiados (baseado em Saggiori et al. 2011).

Perfil	Duração (min.)	Nº de posições	Localização	Altura da vegetação	Altura do escoamento (m)
1	5	12	Duna	-	0,49
2	5	12	Duna	-	0,73
3	5	12	Duna	-	0,89
4	10	12	Fronteira	80%	0,96
5	10	12	Fronteira	70%	0,91
6	10	19	Vegetação	75%	1,01
7	10	16	Vegetação	Superfície livre	0,98
8	10	16	Vegetação	65%	0,88
9	10	16	Vegetação	Superfície livre	0,91
10	10	16	Vegetação	Superfície livre	0,91

O número de posições indicado na tabela 3.1 refere-se à posição do ADV-Vectrino relativamente ao eixo vertical. A posição 1 situa-se sempre junto à superfície livre a última posição situa-se sempre junto ao leito do rio. A duração total dos ensaios variou entre os 60 minutos (para os primeiros 3 perfis) e os 190 minutos (para o perfil 6). A duração da Tabela 3.1 (ver acima), refere-se ao tempo que foi despendido na medição de cada posição.

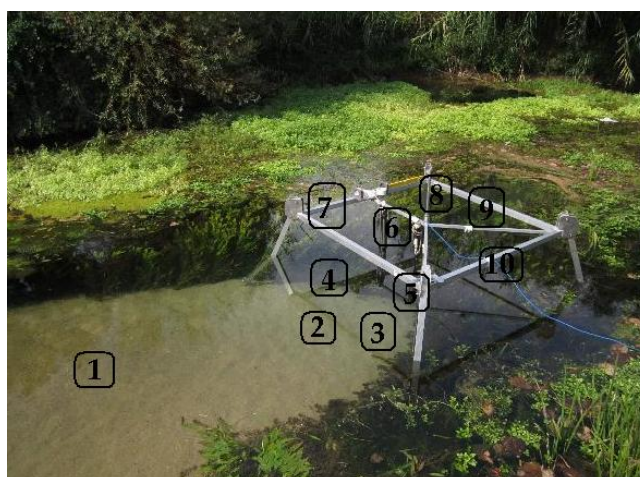


Figura 3.7: Localização dos dez perfis ensaiados (baseado em Saggiori et al. 2011).

Tabela 3.2: Análise segundo z/h para cada posição de todos os Perfis ensaiados.

Posição	Z / H - Perfil									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,965	0,971	0,964	0,921	0,942	0,978	0,963	0,938	0,927	0,927
2	0,886	0,907	0,834	0,840	0,845	0,919	0,927	0,860	0,856	0,856
3	0,741	0,823	0,739	0,750	0,756	0,859	0,869	0,783	0,787	0,787
4	0,649	0,756	0,688	0,695	0,689	0,802	0,806	0,705	0,720	0,720
5	0,529	0,593	0,628	0,638	0,619	0,744	0,739	0,631	0,654	0,654
6	0,463	0,497	0,565	0,578	0,556	0,686	0,676	0,552	0,592	0,592
7	0,392	0,400	0,506	0,518	0,487	0,645	0,616	0,476	0,553	0,553
8	0,329	0,312	0,436	0,458	0,419	0,605	0,574	0,425	0,513	0,513
9	0,249	0,230	0,325	0,355	0,351	0,566	0,532	0,375	0,476	0,476
10	0,186	0,149	0,194	0,247	0,195	0,525	0,491	0,328	0,440	0,440
11	0,141	0,081	0,100	0,138	0,023	0,485	0,451	0,281	0,416	0,416
12	0,076	0,025	0,013	0,020	0,002	0,448	0,412	0,231	0,382	0,382
13	-	-	-	-	-	0,405	0,370	0,181	0,327	0,327
14	-	-	-	-	-	0,370	0,247	0,124	0,280	0,280
15	-	-	-	-	-	0,338	0,162	0,064	0,164	0,164
16	-	-	-	-	-	0,297	0,054	0,026	0,059	0,059
17	-	-	-	-	-	0,257	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	0,178	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0,095	-	-	-	-

# Capítulo 4

## Tratamento de dados

### 4.1 – Introdução

Foram escolhidos dois perfis para se efectuarem a análise de resultados: Perfil 1 (situado na duna) e Perfil 7 (situado na vegetação). O ADV-Vectrino apresentou erros excessivos e sistemáticos na componente vertical pelo que apenas foram consideradas os dados recolhidos para o plano horizontal, ou seja, o tratamento de dados foi efectuado para as velocidades instantâneas obtidas segundo a componente longitudinal e transversal.

### 4.2 – Filtragem de dados

Ao se utilizar o ADV-Vectrino os dados recolhidos apresentam algum ruído, algo que é comum ao próprio processo de recolha de dados e que pode ser causado pelo Doppler, falta de sedimentos ou contaminação exterior. Para além do ruído é possível observar valores elevados de velocidade instantânea, denominados como picos. Estes picos ocorrem quando a velocidade do escoamento excede o intervalo de valores pré-definido no Doppler ou quando a recepção do sinal emitido é fraca.

A Filtragem dos dados é feita em matlab através do filtro de Goring-Nikora (Capítulo 2.4) e de um programa denominado clean. No caso do filtro de Goring-Nikora, após vários testes, concluiu-se que o melhor método de substituição baseia-se na construção de um polinómio do 3º grau (pois permite a curvatura necessária sem adicionar novos picos) usando 12 pontos situados em cada lado do pico. O número de pontos usados está relacionado com a frequência usada pelo Doppler. Foram corridos 3 ciclos.

No caso do programa clean consiste em definir um valor limite para a velocidade instantânea de modo que quaisquer valores absolutos superiores a esse limite sejam eliminados. Foram corridas 32 iterações sendo necessário corrigir o valor limite consoante a posição no Perfil. O programa clean depende de 4 parâmetros:

1) U\_raw e V\_raw: Velocidades instantâneas obtidas no ensaio de campo para Perfil 1 e Perfil 7 na direcção longitudinal e transversal, respectivamente;

2) Nstd: Limite imposto, relacionado directamente com o desvio padrão, ou seja para Nstd = 4, significa que o limite da velocidade instantânea é, no máximo, igual a 4 vezes o desvio padrão;

3) MaxIter: Número de iterações que o programa clean corre;

4) Lim: Limite imposto para a velocidade instantânea, em valor absoluto.

O valor de Nstd e o valor Limite foi escolhido após análise dos valores da velocidade instantânea, procedendo-se assim à substituição de todos aqueles considerados como picos. Este processo foi efectuado para ambos os perfis, segundo a direcção longitudinal e transversal, em todas as posições.

As tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 contêm o resumo de todos os valores usados para cada variável do Goring-Nikora e clean.

Tabela 4.1: Filtragem de dados – Perfil 1 –  $u(t)$ 

<b>Perfil 1 - Direcção Longitudinal</b>				
Posição	Nº de ciclos corridos por GN	Nstd	Nº de iterações de "clean"	Limite (m/s)
1	3	4	32	0,225
2	3	4	32	0,250
3	3	4	32	0,325
4	3	4	32	0,385
5	3	4	32	0,400
6	3	4	32	0,350
7	3	4	32	0,275
8	3	4	32	0,230
9	3	4	32	0,225
10	3	4	32	0,210
11	3	4	32	0,200
12	3	4	32	0,190

Tabela 4.2: Filtragem de dados – Perfil 1 –  $v(t)$ 

<b>Perfil 1 - Direcção Transversal</b>				
Posição	Nº de ciclos corridos por GN	Nstd	Nº de iterações de "clean"	Limite (m/s)
1	3	4	32	0,0675
2	3	4	32	0,0595
3	3	4	32	0,0715
4	3	4	32	0,0805
5	3	4	32	0,0575
6	3	4	32	0,0635
7	3	4	32	0,0550
8	3	4	32	0,0450
9	3	4	32	0,0550
10	3	4	32	0,0500
11	3	4	32	0,0475
12	3	4	32	0,0750

Tabela 4.3: Filtragem de dados – Perfil 7 –  $u(t)$

<b>Perfil 7 - Direcção Longitudinal</b>				
Posição	Nº de ciclos corridos por GN	Nstd	Nº de iterações de "clean"	Limite (m/s)
1	3	4	32	0,0035
2	3	4	32	0,1650
3	3	4	32	-
4	3	4	32	0,0650
5	3	8	32	0,1500
6	3	4	32	0,0075
7	3	4	32	0,0185
8	3	4	32	0,0275
9	3	4	32	0,0255
10	3	4	32	0,0325
11	3	4	32	-
12	3	4	32	0,0385
13	3	4	32	-
14	3	4	32	0,0685
15	3	4	32	-
16	3	4	32	0,0655

Tabela 4.4: Filtragem de dados – Perfil 7 –  $v(t)$ 

<b>Perfil 7 - Direcção Transversal</b>				
Posição	Nº de ciclos corridos por GN	Nstd	Nº de iterações de "clean"	Limite (m/s)
1	3	4	32	0,0010
2	3	4	32	0,0350
3	3	4	32	-
4	3	4	32	0,0125
5	3	32	32	0,0075
6	3	4	32	0,0055
7	3	4	32	0,0095
8	3	4	32	0,0085
9	3	4	32	0,0155
10	3	4	32	0,0145
11	3	4	32	-
12	3	4	32	0,0250
13	3	4	32	-
14	3	4	32	0,0325
15	3	4	32	-
16	3	4	32	0,0550

Após ter sido feita uma primeira Filtragem de dados, observou-se que em certas posições dos perfis analisados seria necessário uma selecção criteriosa do intervalo de dados usados, pois o ruído existente era demasiado elevado para ser tratado através do Goring-Nikora e do clean. A selecção foi feita de forma a se obter os intervalos com menos ruído e com a maior duração possível.

Em certos casos, especialmente no Perfil 7, devido à contaminação exterior (presença de vegetação), não foi possível utilizar qualquer dado. Tal facto é possível de constatar nas tabelas 4.3 e 4.4 onde, para as posições 3, 11, 13 e 15, não existem quaisquer valores de Limite, ou seja, a Filtragem de dados não foi aplicada e estas posições não foram consideradas nos Resultados (Capítulo 5) e Conclusões (Capítulo 6).

As tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 contêm o resumo respeitante a quais os intervalos usados e a percentagem dos mesmos relativamente ao intervalo total.

É importante referir que, para o Perfil 1, a duração da medição das velocidades instantâneas em cada posição é de 5 minutos (300 segundos) e o intervalo total de dados obtidos é de [1:29652]. Para o Perfil 7 o tempo despendido em cada posição é de 10 minutos (600 segundos), sendo o intervalo total de dados obtidos de [1:59644].

Tabela 4.5: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total –  
Perfil 1 –  $u(t)$

Perfil 1 - Direcção Longitudinal				
Posição	Intervalos de dados usados	% de dados usados	Nº de dados usados	Total dos dados usados (seg.)
1	(1:10000)	33,72%	10000	101,17
2	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
3	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
4	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
5	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
6	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
7	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
8	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
9	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
10	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
11	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
12	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
% Total de dados usados		94,48%		



Tabela 4.6: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total –  
 Perfil 1 –  $v(t)$

<b>Perfil 1 - Direcção Transversal</b>				
Posição	Intervalos de dados usados	% de dados usados	Nº de dados usados	Total dos dados usados (seg.)
1	(1:9900)	33,39%	9900	100,16
2	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
3	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
4	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
5	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
6	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
7	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
8	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
9	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
10	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
11	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
12	(1:29652)	100,00%	29652	300,00
	% Total de dados usados	94,45%		

Tabela 4.7: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total –  
 Perfil 7 –  $u(t)$

<b>Perfil 7 - Direcção Longitudinal</b>				
Posição	Intervalos de dados usados	% de dados usados	Nº de dados usados	Total dos dados usados (seg.)
1	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
2	(46003:56805)	18,11%	10802	108,66
3	-	0,00%	0	0,00
4	(47134:53221)	10,21%	6087	61,23
5	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
6	(46291:54603)	13,94%	8312	83,62
7	(14755:22060)	12,25%	7305	73,49
8	(1:7622)	12,78%	7621	76,66
9	(16243:17408), (21552:22840), (26637:27976), (28567:30292), (52927:53381)	10,01%	5971	60,07
10	(6243:7554), (10083:11165), (16554:17815), (47281:48472), (56482:58003)	10,67%	6366	64,04
11	-	0,00%	0	0,00
12	(6219:7554), (20143:21692), (27693:30005), (38686:39787)	10,07%	6004	60,40
13	-	0,00%	0	0,00
14	(2389:2959), (4045:4856), (8683:9383), (14706:15821), (18920:19640), (46196:47421)	8,62%	5141	51,72
15	-	0,00%	0	0,00
16	(6989:7684), (19935:21675), (53953:55164)	6,11%	3646	36,68
% Total de dados usados		18,63%		

Tabela 4.8: Intervalos usados e sua percentagem relativamente ao intervalo total –  
 Perfil 7 –  $v(t)$

Perfil 7 - Direcção Transversal				
Posição	Intervalos de dados usados	% de dados usados	Nº de dados usados	Total dos dados usados (seg.)
1	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
2	(45461:52805)	12,31%	7344	73,88
3	-	0,00%	0	0,00
4	(47234:53200)	10,00%	5966	60,02
5	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
6	(46000:59644)	22,88%	13644	137,25
7	(14892:22361)	12,52%	7469	75,14
8	(1:7534)	12,63%	7533	75,78
9	(4921:5404), (16243:17409), (21553:23392), (24990:25380), (26670:28260), (28383:29928)	11,76%	7013	70,55
10	(6243:7554), (10076:11165), (16363:17815), (46912:47857), (56482:58006)	10,60%	6321	63,59
11	-	0,00%	0	0,00
12	(6046:7231), (19925:20818), (27881:29738)	6,60%	3935	39,58
13	-	0,00%	0	0,00
14	(2296:2959), (4057:4856), (14698:15821), (46196:47375)	6,31%	3764	37,86
15	-	0,00%	0	0,00
16	(6748:7736), (19184:20543), (54186:56058)	7,07%	4219	42,44
	% Total de dados usados	18,71%		

### 4.3 – Ângulo de correcção

Ao se fazer um ensaio de campo em superfície livre um dos problemas consiste em definir um eixo que permita comparar os mesmos parâmetros em diferentes posições. A direcção adoptada segundo o eixo x no Vectrino teve como ponto de referência o muro de alvenaria (Capítulo 3.4).

O sistema de coordenadas foi escolhido de forma que a direcção segundo x corresponda com a direcção da velocidade média do escoamento no plano horizontal. Para isso é necessário:

a) Calcular a velocidade média longitudinal e transversal de acordo com os eixos do Vectrino;

b) Calcular o ângulo entre o vector da velocidade média e a direcção segundo o eixo x do Vectrino. O objectivo consiste em apurar se o alinhamento que foi definido para o eixo x do Vectrino estava relativamente de acordo com o vector da velocidade média do escoamento.

### 4.4 – Velocidades médias no tempo

Tendo como base os dados limpos através do procedimento enunciado no Capítulo 4.2, foram calculadas, para a direcção longitudinal e transversal, as velocidades médias para o Perfil 1 e Perfil 7.

$$\bar{u}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{n=i} u(t)}{i} \quad (4.1)$$

$$\bar{v}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{n=i} |v(t)|}{i} \quad (4.2)$$

onde,  $u(t)$  e  $v(t)$  correspondem às velocidades instantâneas obtidas após Filtragem de dados para a direcção longitudinal e transversal, respectivamente;  $i$  representa os intervalos de dados usados (encontram-se descritos nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8).

A diferença no tratamento de dados entre ambas as direcções consiste na utilização dos valores absolutos de velocidades instantâneas para a direcção transversal. Segundo a direcção longitudinal as velocidades obtidas podem ter o sentido do escoamento ou ser contrárias ao escoamento, ou seja, podem ter um valor considerado positivo ou negativo. As velocidades positivas são muito superiores às negativas, no entanto, estas últimas têm de ser consideradas no cálculo de uma média.

Para a direcção transversal existe uma aparente simetria nos valores da velocidade instantânea, pelo que se não fossem considerados os valores absolutos existia uma anulação entre os valores positivos e negativos, obtendo assim uma velocidade média obtida bastante inferior à velocidade média real. Neste caso, o facto da velocidade instantânea ter um sentido considerado positivo ou negativo não tem qualquer importância.

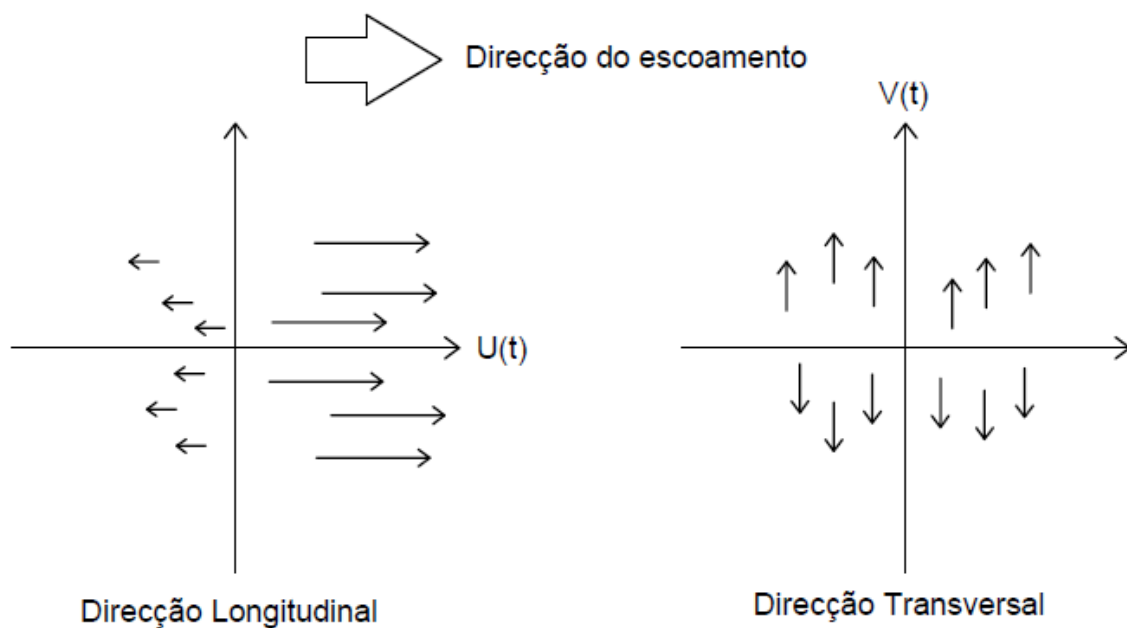


Figura 4.1: Comparação do sentido e influência das velocidades instantâneas segundo a direcção longitudinal e transversal.

## 4.5 – Tensão de Reynolds - VM

VM – Velocidade média Longitudinal ou Transversal (m/s).

Após a filtragem de dados e obtenção das velocidades médias (descritas, respectivamente, no Capítulo 4.2 e Capítulo 4.4) foi efectuada a seguinte metodologia no cálculo das tensões de Reynolds:

i) Cálculo da flutuação da velocidade longitudinal e transversal para ambos os Perfis (Equações 4.3 e 4.4);

$$u'_{i,n} = u_{i,n} - \bar{u}_n \quad (4.3)$$

$$v'_{i,n} = v_{i,n} - \bar{v}_n \quad (4.4)$$

onde,  $u$  representa a velocidade longitudinal após filtragem de dados;  $v$  a velocidade transversal após filtragem de dados;  $n$  os dados usados;  $i$  o número do perfil analisado;  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  as velocidades médias obtidas segundo a direcção longitudinal e transversal;  $u'$  e  $v'$  a flutuação para a direcção longitudinal e transversal.

ii) Cálculo das Tensões de Reynolds:

$$\text{Para obter a tensão normal de Reynolds: } \tau_{i,n} = u'_{i,n} \times u'_{i,n} \quad (4.5)$$

$$\text{Para obter a tensão tangencial de Reynolds: } \tau_{i,n} = u'_{i,n} \times v'_{i,n} \quad (4.6)$$

$$\bar{\tau}_i = \frac{\sum \tau_{i,n}}{n} \quad (4.7)$$

onde,  $\tau_{i,n}$  corresponde à Tensão de Reynolds para os dados  $n$  do perfil  $i$ ; e  $\bar{\tau}_i$  equivale à Tensão de Reynolds (normal ou tangencial, consoante foi usada a Equação 4.5 ou 4.6) para o perfil  $i$ .

Através da filtragem de dados efectuada (Capítulo 4.2) foram eliminados determinados conjuntos de dados de velocidades instantâneas considerados inválidos. Esses dados, matematicamente, são tratados como tendo um valor de velocidade nulo o que não corresponde à realidade. Para esta dissertação o cálculo da Tensão de Reynolds implica que o intervalo de dados usados ( $n$ ) segundo a direcção longitudinal e transversal tenha de ser o mesmo, caso contrário o valor de  $\tau$  será nulo.

Tabela 4.9: Exemplo do intervalo de dados comuns para o Perfil 1, Posição 1.

Dados após Filtragem efectuada			
Dados	u (m/s)	v (m/s)	
1	0,0437	-0,0086	Dados em comum
2	0,0625	-0,0054	
3	0,0709	-0,0039	
4	0,0875	0,0026	
5	0,0830	-0,0051	
⋮	⋮	⋮	
9900	0,0325	0,0100	Dados não utilizados
9901	0,0434	-	
9902	0,0297	-	
9903	0,0967	-	
9904	0,1122	-	
9905	0,1132	-	
⋮	⋮	-	
10000	0,0536	-	
10001	-	-	
10002	-	-	
10003	-	-	
10004	-	-	
⋮	-	-	
299652	-	-	

De forma a se superar este problema foi necessário fazer uma nova selecção dos dados usados. Com base nas tabelas 4.7 e 4.8, foram seleccionados os intervalos de dados considerados úteis comuns segundo a direcção longitudinal e transversal.

Tabela 4.10: Intervalos de dados comuns segundo ambas as direcções e a sua percentagem relativamente ao intervalo total – Perfil 7.

<b>Perfil 7</b>				
Posição	Intervalo de dados comum segundo a direcção longitudinal e transversal	% de dados usados	Nº de dados usados	Total dos dados usados (seg.)
1	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
2	(46003:52805)	11,40%	6802	68,43
3	-	0,00%	0	0,00
4	(47234:53200)	10,00%	5966	60,02
5	(1:59644)	100,00%	59644	600,00
6	(46291:54603)	13,94%	8312	83,62
7	(14892:22060)	12,02%	7168	72,11
8	(1:7534)	12,63%	7534	75,79
9	(16243:17408), (21553:22840), (26670:27976), (28567:29928)	8,58%	5119	51,50
10	(6243:7554), (10083:11165), (16554:17815), (47281:47857), (56482:58003)	9,64%	5751	57,85
11	-	0,00%	0	0,00
12	(6219:7231), (20143:20818), (27881:29738)	5,94%	3544	35,65
13	-	0,00%	0	0,00
14	(2389:2959), (4045:4856), (14706:15821), (46196:47375)	6,16%	3675	36,97
15	-	0,00%	0	0,00
16	(6989:7736), (19935:20543), (54186:55164)	3,91%	2333	23,47
	% Total dos dados usados	18,39%		



## 4.6 – Tensão de Reynolds – VMTA

VMTA – Velocidade média Transversal absoluta (m/s).

O cálculo da tensão de Reynolds está directamente relacionado com o valor da velocidade média de escoamento (ver Capítulo 4.5 – Equações 4.3 e 4.4). No entanto, tal como foi demonstrado no Capítulo 4.4 (ver Figura 4.1) o valor da velocidade média real de escoamento para uma direcção transversal ao escoamento (identificada nesta dissertação através do eixo  $v$ ) não deve ser influenciado pelo seu sentido.

Por este motivo, foi calculada uma nova tensão de Reynolds tendo em conta a influência do valor absoluto da velocidade média. De forma a se traduzir este raciocínio em termos matemáticos foi necessário ter em conta 2 factores: i) Valor da velocidade instantânea após filtragem de dados (positivo ou negativo); ii) Valor da velocidade média.

Ou seja, para valores positivos da velocidade instantânea, o valor real da flutuação  $v'$  é obtido a partir do valor absoluto positivo da velocidade média. Para valores negativos da velocidade instantânea, o valor real da flutuação  $v'$  é obtido a partir do valor absoluto negativo da velocidade média.

$$\text{Para } v_{i,n} > 0: v'_{i,n} = v_{i,n} - |\bar{v}_n| \quad (4.7)$$

$$\text{Para } v_{i,n} < 0: v'_{i,n} = v_{i,n} - (-|\bar{v}_n|) \quad (4.8)$$

onde,  $v$  representa a velocidade transversal após filtragem de dados;  $n$  os dados usados;  $i$  o número do perfil analisado;  $|\bar{v}_n|$  as velocidades médias obtidas, em valor absoluto, segundo a direcção transversal;  $v'$  o flutuação para a direcção transversal.

Finalmente, são aplicadas as equações 4.5 e 4.6 indicadas no Capítulo 4.5, de forma a ser calculada a tensão de Reynolds.

## 4.7 – Análise de Quadrantes

Após a filtragem de dados, obtenção das velocidades médias (descritas, respectivamente, no Capítulo 4.2 e Capítulo 4.4) e cálculo do flutuação longitudinal e transversal (ver Equações 4.3 e 4.4) foi efectuada a seguinte metodologia na análise de eventos:

$$1^{\text{o}} \text{ Quadrante: } Q_{1^{\text{o}}\text{quadrante}} = \left\{ u', v' \in \mathbb{R}: u' > 0 \text{ e } v' > \frac{\sigma_h^{(I)}}{u'} \right\} \quad (5.1)$$

$$2^{\text{o}} \text{ Quadrante: } Q_{2^{\text{o}}\text{quadrante}} = \left\{ u', v' \in \mathbb{R}: u' < 0 \text{ e } v' > \frac{\sigma_h^{(II)}}{|u'|} \right\} \quad (5.2)$$

$$3^{\text{o}} \text{ Quadrante: } Q_{3^{\text{o}}\text{quadrante}} = \left\{ u', v' \in \mathbb{R}: u' < 0 \text{ e } |v'| < \frac{\sigma_h^{(III)}}{|u'|} \right\} \quad (5.3)$$

$$4^{\text{o}} \text{ Quadrante: } Q_{4^{\text{o}}\text{quadrante}} = \left\{ u', v' \in \mathbb{R}: u' > 0 \text{ e } |v'| < \frac{\sigma_h^{(IV)}}{u'} \right\} \quad (5.4)$$

onde,  $u'$  e  $v'$  representam o flutuação longitudinal e transversal, respectivamente.

$$\sigma_h^{(I)} = \sigma_h^{(II)} = \sigma_h^{(III)} = \sigma_h^{(IV)} \quad (5.5)$$

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u^2}} \quad (5.6)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} \quad (5.7)$$

$$\sigma_h = H \cdot u_{rms} \cdot v_{rms} \quad (5.8)$$

onde,  $H$  representa o tamanho do buraco (quanto maior  $H$ , menor a quantidade de eventos considerados);  $u_{rms}$  e  $v_{rms}$  a turbulência associada à velocidade longitudinal e transversal, respectivamente.

Este raciocínio foi baseado no artigo de Ferreira R.M.L et al. (2009) e adaptado às características desta dissertação. Ao estar-se a trabalhar apenas no plano horizontal implica que, na realidade, não se possa designar os eventos como interacções para fora, ejeções, interacções para dentro e varrimentos (ver Figura 2.1, onde é verificado que os eventos do fenómeno bursting têm uma componente vertical que não existe nesta dissertação). Por este motivo, os eventos foram identificados como sendo 1º, 2º, 3º e 4º Quadrante.

Através deste método o somatório das contribuições de cada quadrante para  $H=0$  tem de ser igual a 1, ou seja, 100%. Esta verificação foi efectuada em todas as posições do Perfil 1 e Perfil 7, existindo assim uma confirmação que não se está a modificar a contribuição de qualquer quadrante na análise de eventos.

O valor de  $H$  está directamente relacionado com o valor das velocidades instantâneas longitudinais e transversais (ver Figura 2.4 – É de realçar que a componente  $v$  na Figura 2.4 refere-se às velocidades instantâneas verticais, o que não se verifica nesta dissertação, onde  $v$  representa as velocidades instantâneas transversais). Quanto maior for a dimensão de  $H$  menor será o conjunto de velocidades instantâneas abrangido e, conseqüentemente, menor será a contribuição dos eventos no fenómeno bursting.

Finalmente, é necessário ter em conta que segundo a direcção transversal, a velocidade média deve ser calculada em valor absoluto (este pormenor foi explicado no Capítulo 4.4). Tal como para a tensão de Reynolds (ver Capítulo 4.6), foram efectuadas 2 análises de eventos: Através de VM e de VMTA.



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 – Filtragem de dados

Tendo como base a informação do Capítulo 4.2 pode-se caracterizar a Filtragem dos dados, para certas posições, como tendo duas fases. A primeira fase consiste na aplicação do Goring-Nikora e do programa clean de modo a eliminar os picos; a segunda fase (caso seja necessária) consiste na utilização dos intervalos de dados que contêm menor ruído (ver Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8). Por este motivo os resultados apresentados para a Filtragem de dados são divididos em Iniciais e Finais:

- Resultados Iniciais: Refere-se à primeira fase de Filtragem de todas as posições que necessitaram de uma segunda fase;
- Resultados Finais: Refere-se à comparação final entre velocidades instantâneas obtidas em campo, após escolha dos intervalos de dados considerados válidos.

Esta apresentação de resultados permite uma melhor compreensão da diferença, na Filtragem de dados, entre a utilização do intervalo de dados total e a utilização dos intervalos de dados considerados mais válidos.

### 5.1.1 – Perfil 1 – Resultados Iniciais

Ao se analisar os dados obtidos para este Perfil, apenas a posição 1 apresentava bastante ruído (ver Figura 5.1), especialmente nos últimos dois terços do intervalo de dados, aproximadamente 1 minuto e 40 segundos após se ter começado a gravação dos valores de velocidade instantânea. Isto deve-se ao facto desta posição estar em maior proximidade da superfície livre sendo por isso mais susceptível a contaminação proveniente do exterior (folhas, ramos ou o próprio vento).

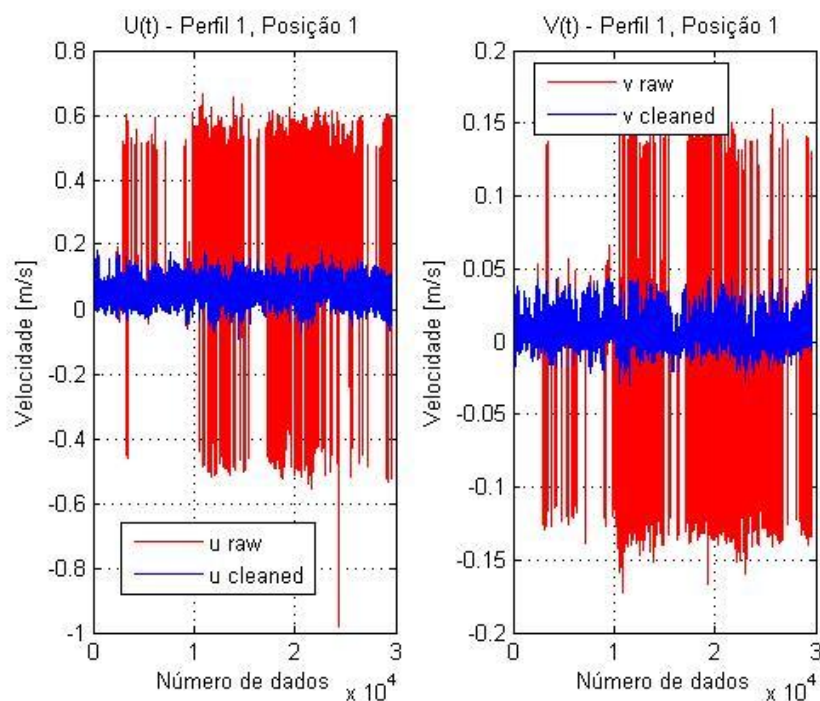


Figura 5.1: Perfil 1, Posição 1 – Direcção longitudinal e transversal – Filtragem inicial de dados

### 5.1.2 – Perfil 1 – Resultados Finais

Após tratamento dos dados recolhidos em campo de forma a eliminar quaisquer valores considerados excessivos é possível observar que, na sua maioria, os dados obtidos são bastante satisfatórios na medida em que a quantidade de ruído é consideravelmente baixa e a percentagem de dados usados, comparativamente com a quantidade de dados iniciais, é elevada (com base nas Tabelas 4.5 e 4.6 pode-se constatar que é de, aproximadamente, 94%).

#### 5.1.2.1 – Direcção Longitudinal

A única posição onde foi necessário existir uma alteração do intervalo de dados a analisar foi a posição 1 (situada junto à superfície livre) onde foram usados 33,72 % dos dados iniciais, o que corresponde a uma duração de 101,17 segundos.

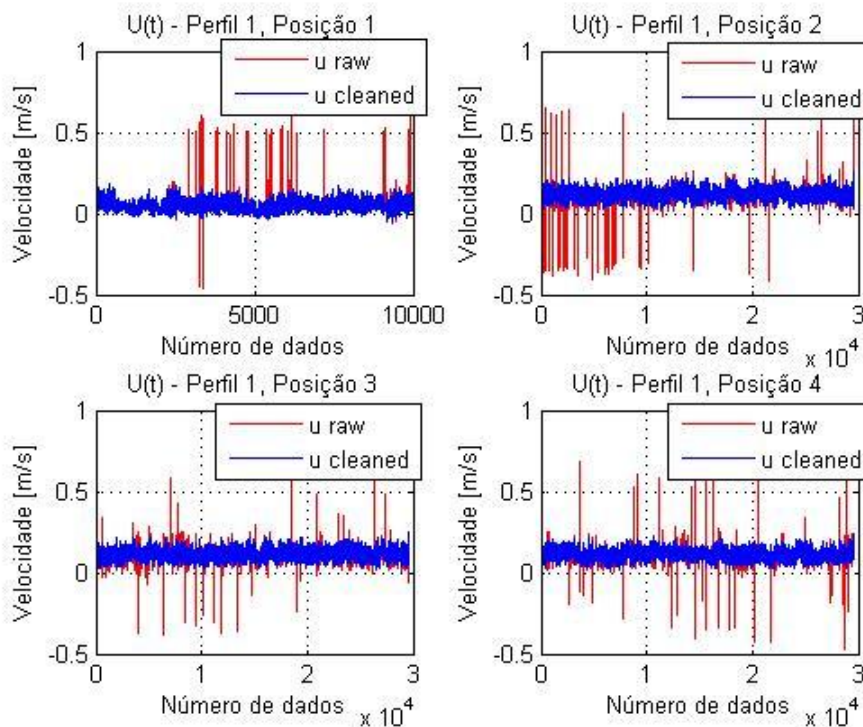


Figura 5.2: Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 1, 2, 3 e 4

O motivo pelo qual esta posição ter sido a única (ao longo do Perfil 1) onde existiu uma diminuição do intervalo de dados considerados úteis está directamente relacionado com factores externos associados à superfície livre (como por exemplo, o facto da estrutura metálica estar demasiado próximo da sonda e influenciar as medições de velocidades instantâneas).

Através das próximas 2 figuras (5.3 e 5.4) é visível que a quantidade de ruído existente, observável nas figuras como sendo valores de pico de  $u_{\text{raw}}$ , é praticamente inexistente.

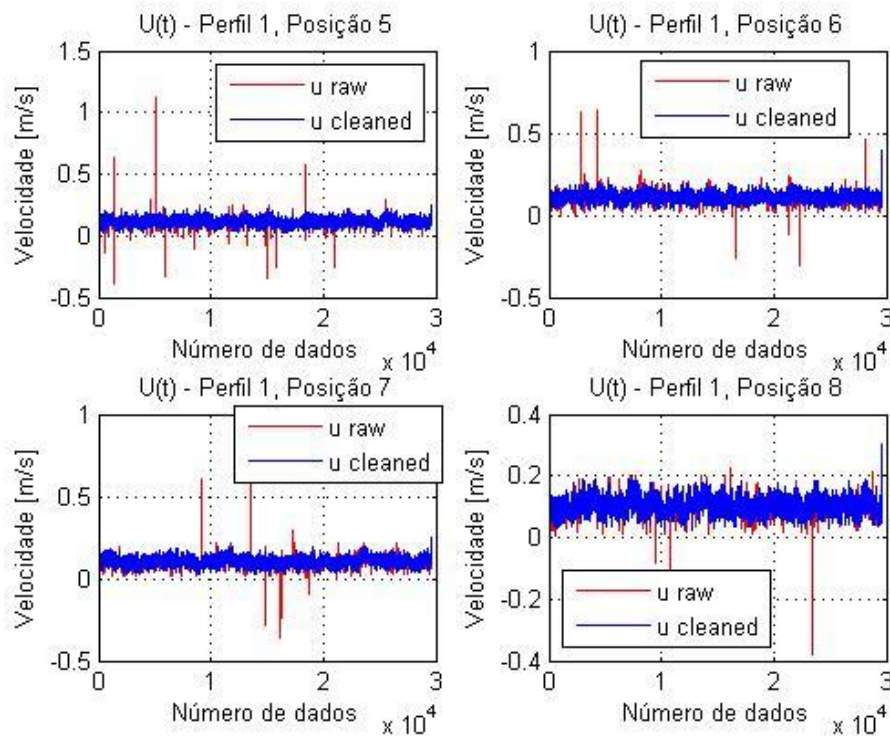


Figura 5.3: Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 5, 6, 7 e 8



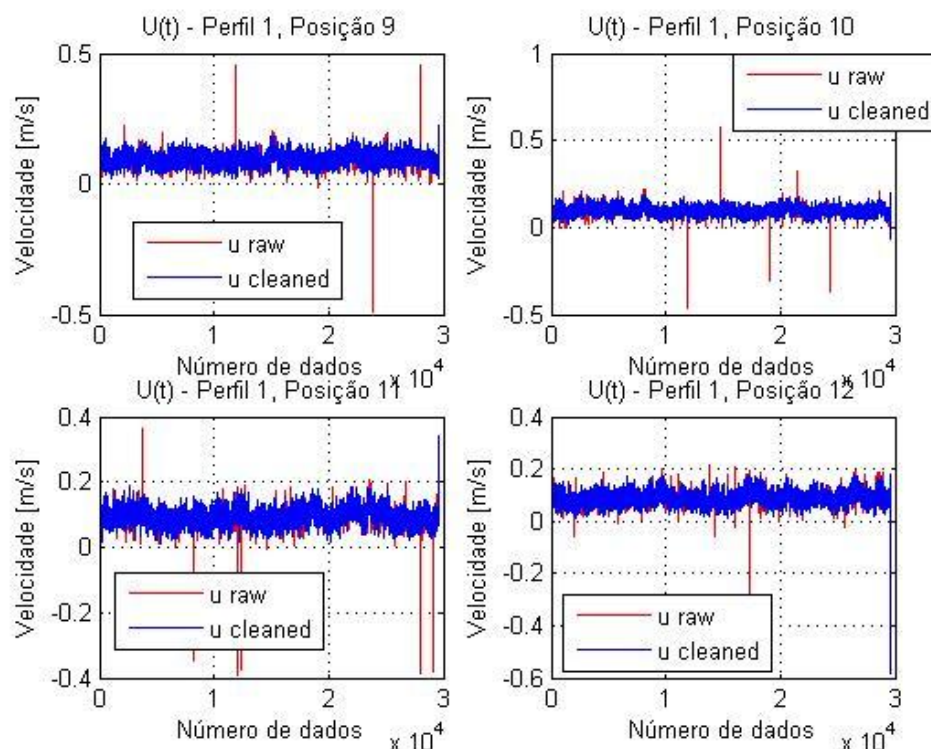


Figura 5.4: Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 9, 10, 11 e 12

Com base nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 podemos concluir que, à medida que nos afastamos da superfície livre a qualidade dos resultados obtidos melhora. É possível também observar que a velocidade obtida para todas as posições é superior a zero (salvo pequenas exceções ao longo do intervalo de dados) o que está de acordo com o sentido do escoamento.

### 5.1.2.2 – Direcção Transversal

Tal como segundo a direcção longitudinal, a única posição onde foi necessário existir uma alteração do intervalo de dados a analisar foi a posição 1 (situada junto à superfície livre) onde foram usados 33,39 % dos dados iniciais, o que corresponde a uma duração de 100,16 segundos.

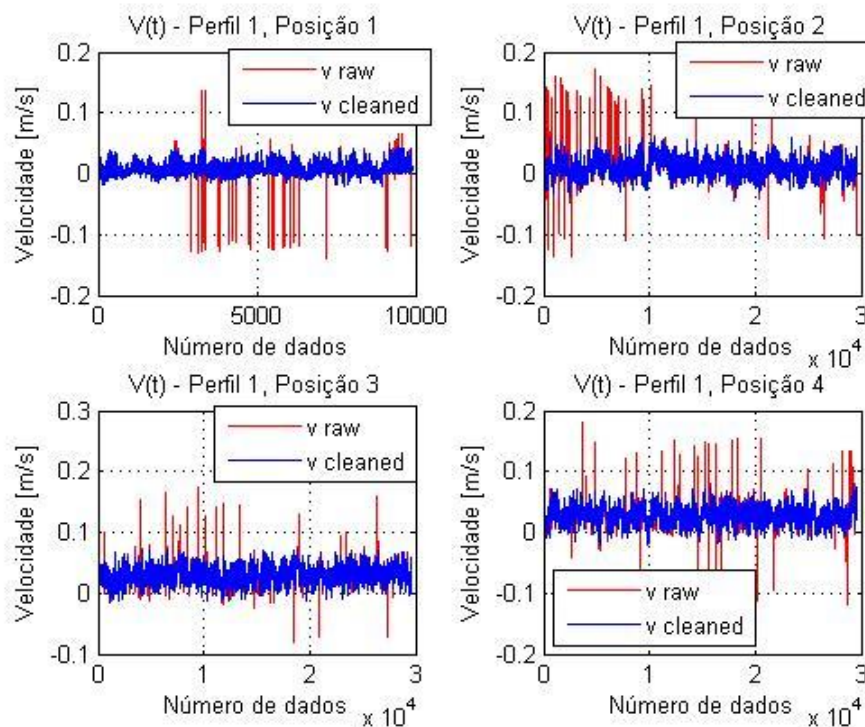


Figura 5.5: Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 1, 2, 3 e 4

Através das próximas 2 figuras (5.6 e 5.7) é que a quantidade de ruído existente, observável nas figuras como sendo valores de pico de  $v_{\text{raw}}$ , é praticamente inexistente.

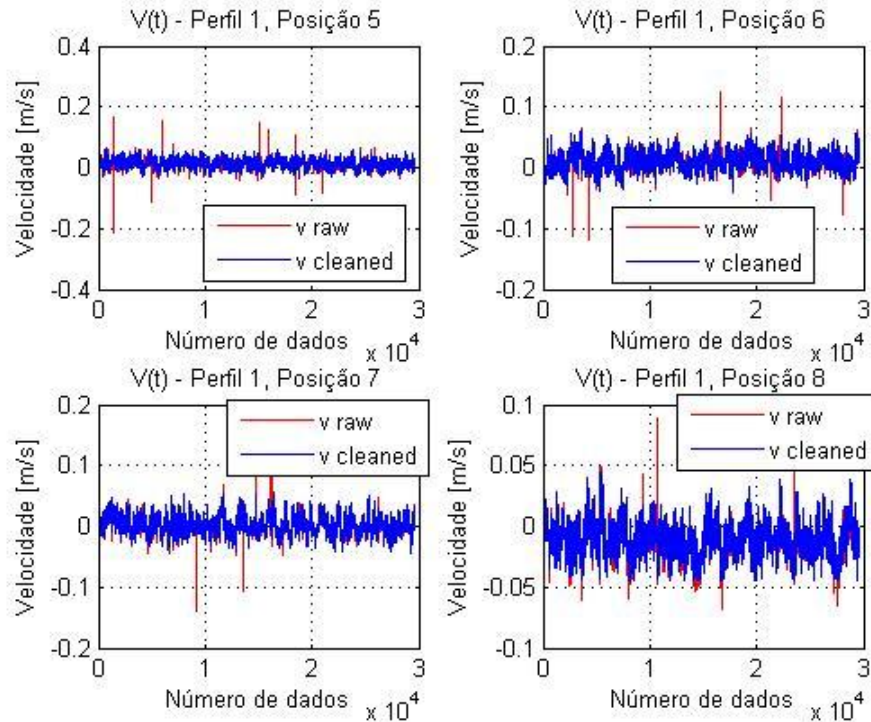


Figura 5.6: Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 5, 6, 7 e 8

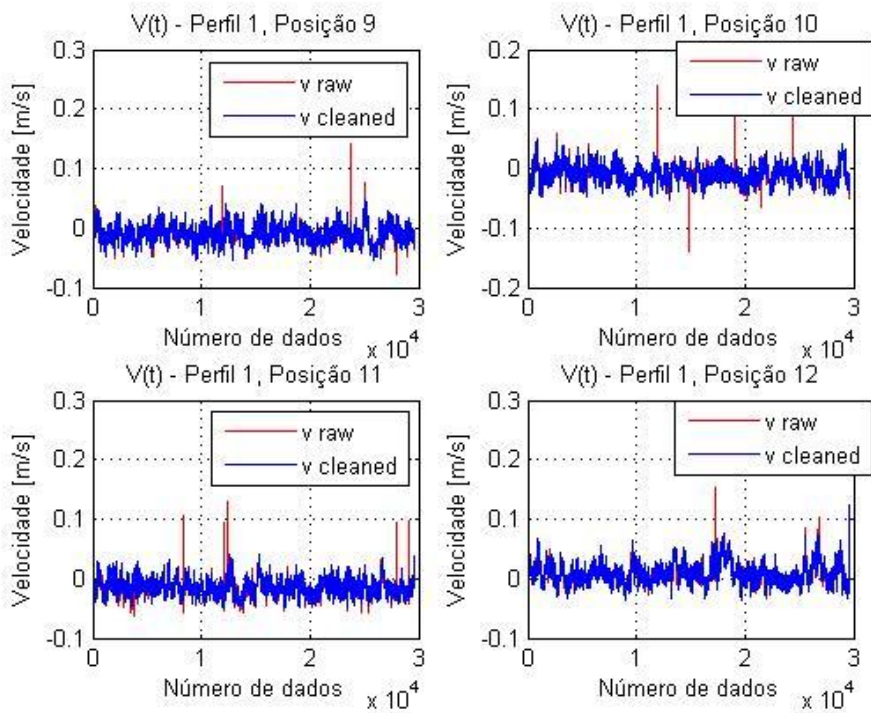


Figura 5.7: Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 1, Posição 9, 10, 11 e 12

Com base nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 podemos concluir que, à medida que nos aproximamos do leito do rio, a quantidade de ruído existente diminui (algo que também se verifica segundo uma direcção longitudinal). A qualidade dos dados obtidos e o intervalo dos dados considerados úteis é praticamente idêntico entre ambas as direcções.

No entanto, segundo a direcção transversal, é possível observar que a velocidade obtida, ao longo de cada posição, tende a ser simétrica, ou seja, a quantidade de dados com velocidade superior a zero é aparentemente equiparada pela quantidade de dados com velocidade inferior a zero.

### **5.1.3 – Perfil 7 – Resultados Iniciais**

Através da Filtragem efectuada por Goring-Nikota e pelo programa clean, verificou-se que este Perfil contém uma quantidade considerável de ruído em todas as posições, excepto a posição 1 e 5. Isto deve-se ao facto de estar situado na vegetação, sendo por isso mais susceptível a contaminação proveniente do exterior (folhas e/ou ramos).

As posições 1 e 5 apresentaram boa qualidade de dados, não sendo necessário ser efectuada uma filtragem inicial que as restantes posições tiveram de se sujeitar. Esta filtragem inicial refere-se à escolha dos intervalos de dados considerados úteis, motivo pelo qual para este Capítulo 5.1.3 não são apresentadas as figuras referentes às posições 1 e 5. Para estas 2 posições o intervalo de dados úteis é igual ao intervalo de dados total.

As figuras seguintes permitem constatar a quantidade e a semelhança existente nos intervalos de dados, ao longo dos 10 minutos de medição em cada posição, segundo a direcção longitudinal e transversal.

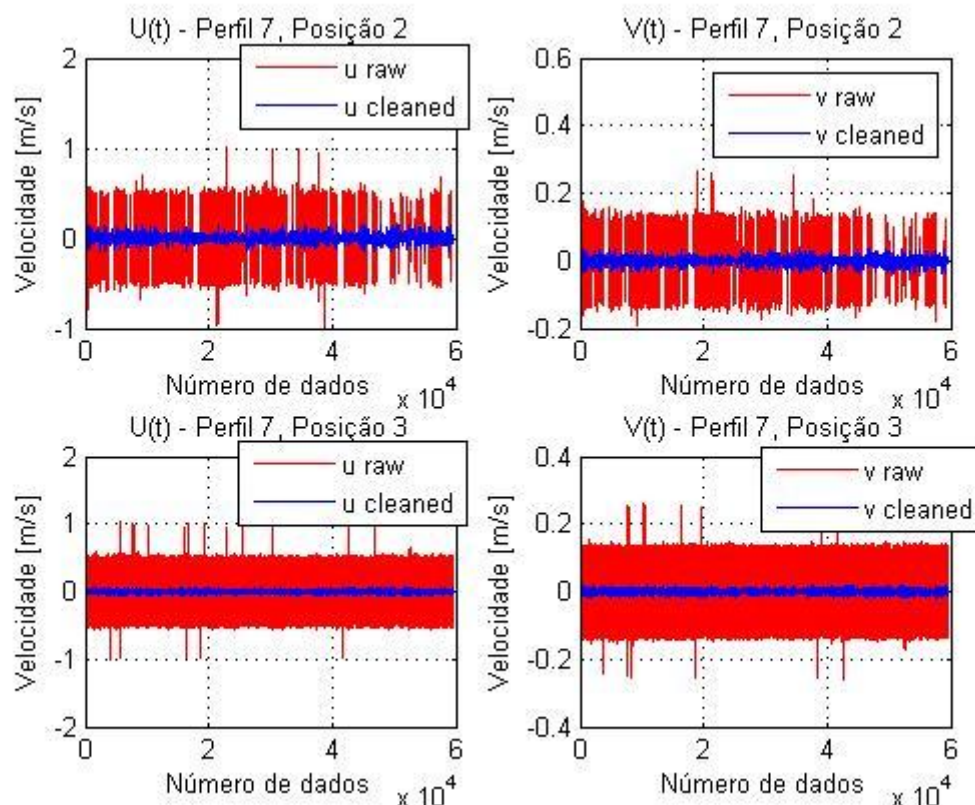


Figura 5.8: Perfil 7 - Posição 2 e 3 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados

A qualidade dos dados obtidos para a posição 2 e 3 não é a melhor, como se pode constatar pela quantidade de ruído existente. É notória a semelhança, para ambas as direcções, dos dados considerados úteis. A posição 3 foi eliminada, não tendo sido utilizada na obtenção de velocidades médias, tensões de Reynolds e análise de quadrantes, pois não existia qualquer intervalo de dados aproveitável.

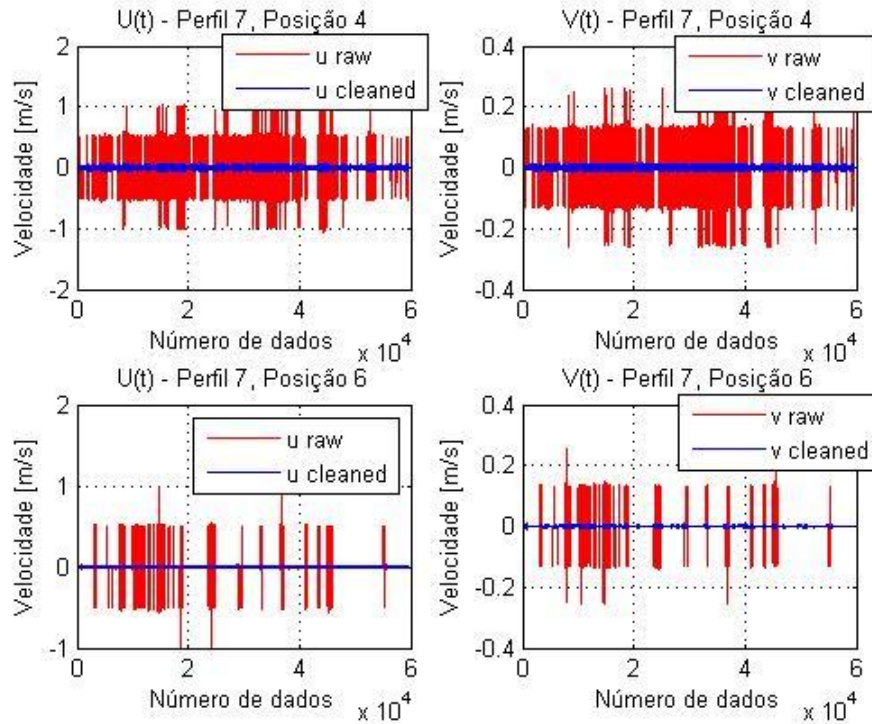


Figura 5.9: Perfil 7, Posição 4 e 6 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados

Para estas 2 posições existe uma diminuição do ruído detectado pelo Doppler, comparativamente com as posições analisadas na figura anterior. Mais uma vez, é notória a afinidade entre ambas as direcções de cada posição. A posição 6 foi, logo a seguir à posição 1 e 5, aquela onde foram registadas menos valores de pico da velocidade instantânea.



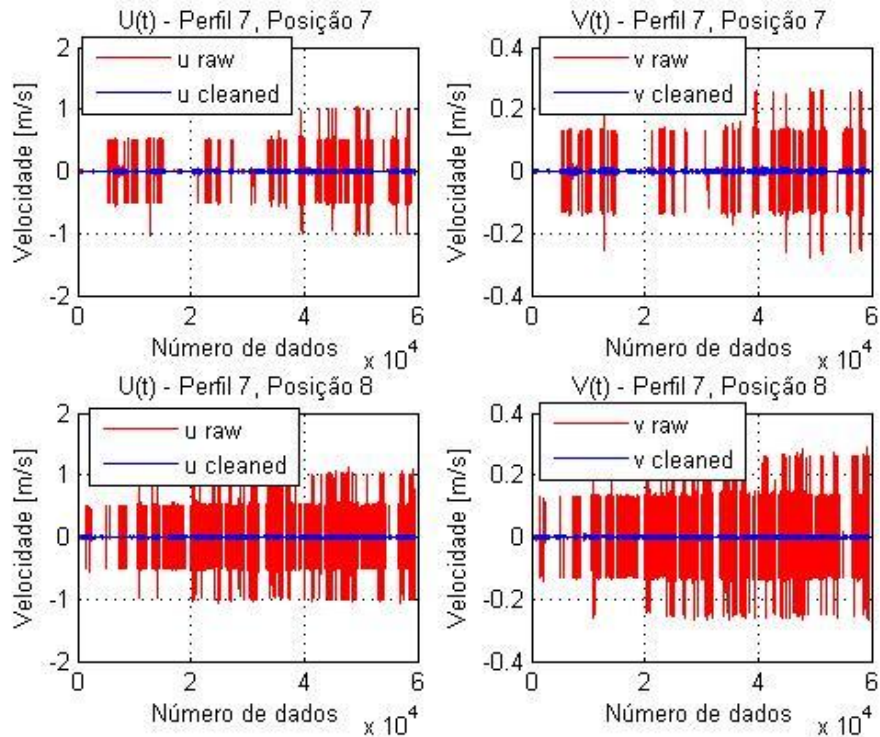


Figura 5.10: Perfil 7, Posição 7 e 8 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais – Filtragem inicial de dados

As posições 7 e 8 foram as últimas, para o Perfil 7, onde foi utilizado apenas um intervalo de dados considerados úteis, não existindo uma quebra na continuidade dos dados obtidos.

Para as posições 9, 10, 12, 14 e 16 existiu uma divisão do intervalo total de dados em vários sub-intervalos (ver Tabelas 4.7 e 4.8) devido à pouca quantidade de dados sem ruído. As posições 11, 13 e 15 foram eliminadas nas análises dos capítulos posteriores (determinação de velocidades médias, cálculo de tensões de Reynolds e análise de quadrantes) devido à pouca quantidade de dados considerados úteis. As figuras referentes às posições 9 a 16 encontram-se no Anexo I.

### **5.1.4 – Perfil 7 – Resultados Finais**

Após tratamento dos dados recolhidos em campo de forma a eliminar quaisquer valores considerados excessivos é possível observar que, na sua maioria, os dados obtidos apresentam bastantes condicionantes, ou seja, a quantidade de ruído é elevada e a percentagem de dados usados, comparativamente com a quantidade de dados iniciais, é baixa (com base nas Tabelas 4.7 e 4.8 pode-se constatar que é de, aproximadamente, 19%).

As posições 3, 11, 13 e 15 não se encontram representadas nas figuras seguintes devido à quantidade elevada de distorção presente ao longo de todo o intervalo de dados [1:59644]. Optou-se por eliminar estas posições ao invés de ser efectuada a Filtragem de dados.

#### **5.1.4.1 – Direcção Longitudinal**

Após filtragem dos dados e escolha dos intervalos de dados constata-se que continuam a existir valores de pico ao longo de todas as posições, especialmente para as posições junto ao leito do rio.

A figura seguinte contém a comparação entre as velocidades instantâneas iniciais e após filtragem de dados para as posições 1, 2, 4 e 5. As posições 1 e 5 são as únicas que utilizaram o intervalo de dados total.



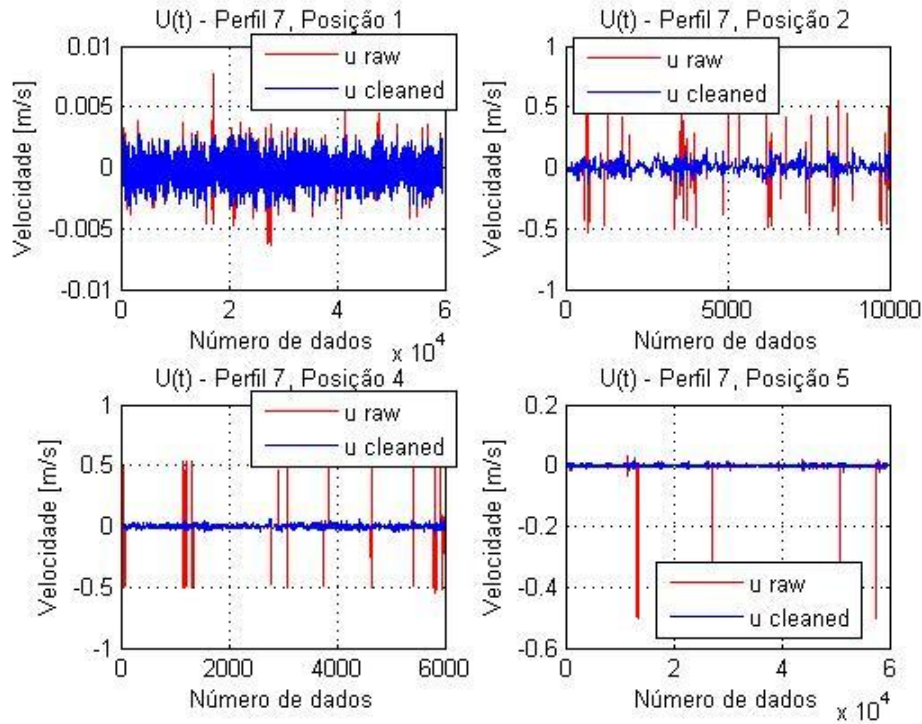


Figura 5.11: Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 1, 2, 4 e 5

As figuras referentes às restantes posições (6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16) encontram-se no Anexo II. A posição 9 contém o sub-intervalo de dados considerados úteis com menor duração (ver Tabela 4.7 – Posição 9 – Intervalo [52927:53381]). Este sub-intervalo corresponde a 4,57 segundos de dados contínuos.

### 5.1.4.2 – Direcção Transversal

A semelhança entre a direcção longitudinal e transversal na qualidade dos dados e, conseqüentemente, na escolha dos intervalos de dados considerados úteis verifica-se para o Perfil 7, tal como se verificou para o Perfil 1.

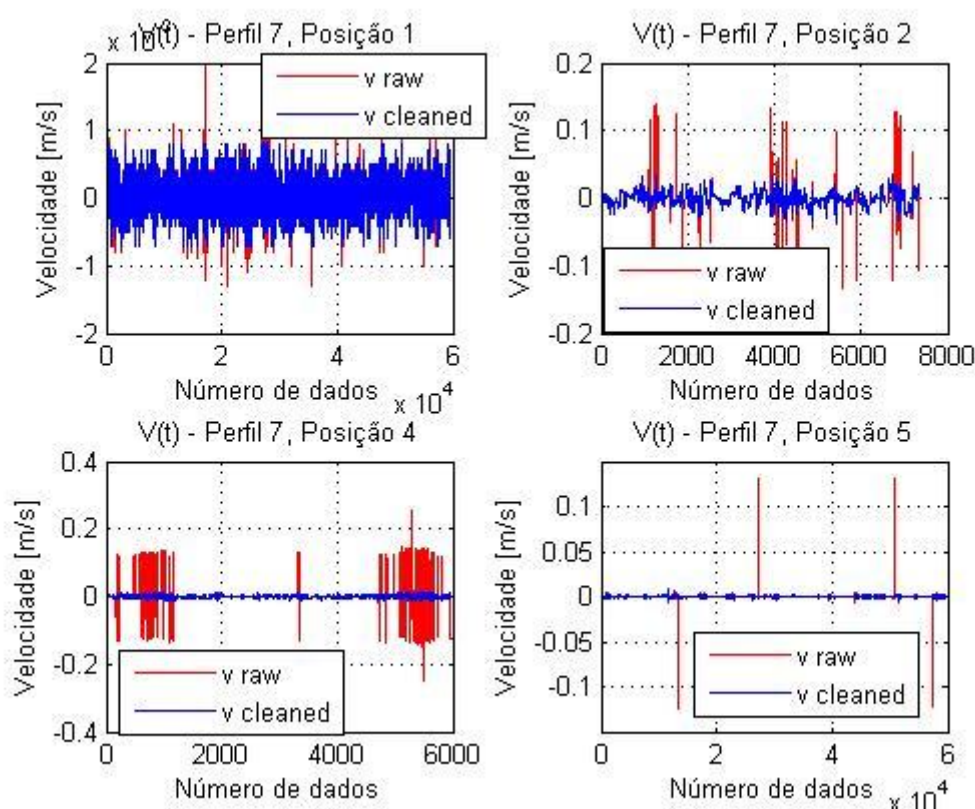


Figura 5.12: Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados – Perfil 7, Posição 1, 2, 4 e 5

As posições 1 e 5 são as únicas que utilizaram o intervalo de dados total. As figuras referentes às restantes posições (6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16) encontram-se no Anexo II. A posição 9 contém o intervalo de dados considerados úteis com menor duração (ver Tabela 4.8 – Posição 9 – [24990:25380]). Este intervalo corresponde a 3,92 segundos de dados contínuos, sendo a menor duração registada de entre todos os intervalos de dados filtrados.

## 5.2 – Ângulo de Correção

O desvio do perfil 7 é um pouco superior ao do perfil 1 devido a 2 motivos:

- i) O ensaio para o perfil 7 foi feito num local com bastante vegetação, o que dificultou a visualização do Vectrino e consequentemente a sua orientação;
- ii) O perfil 7 foi ensaiado num local mais afastado da referência usada para o eixo x das coordenadas, nomeadamente, o muro de alvenaria. No entanto, o desvio do Vectrino relativamente ao vector da velocidade média do escoamento é baixo, confirmando-se assim que esteve sempre bem alinhado.

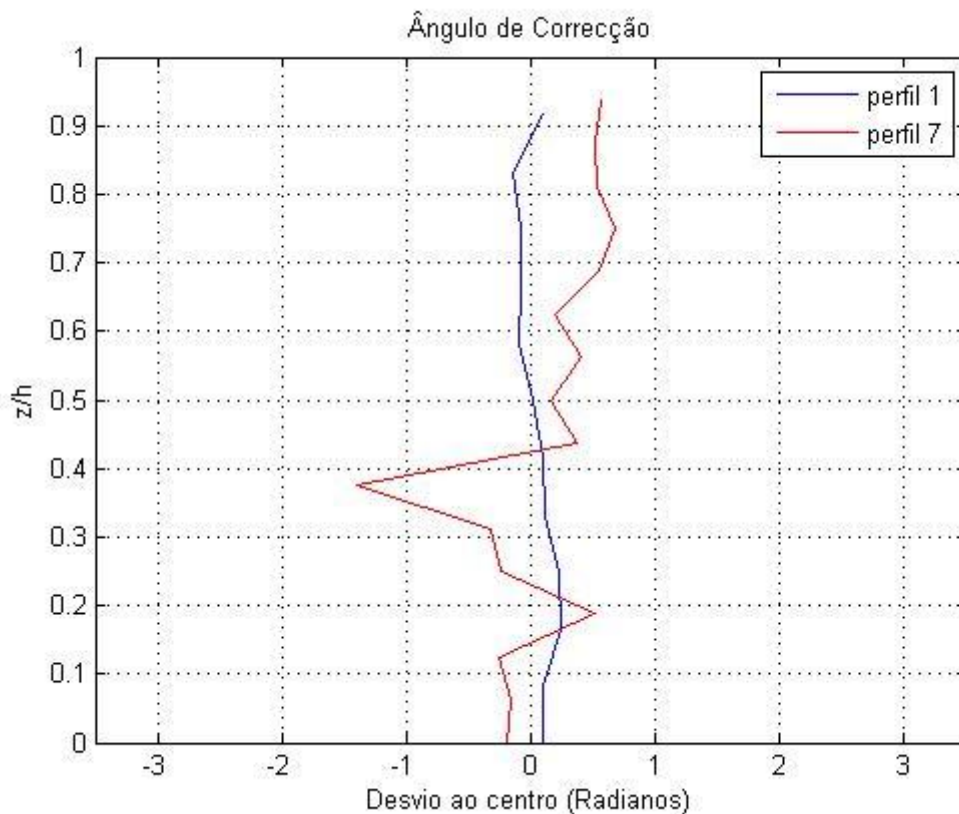


Figura 5.13: Comparação do ângulo de correcção entre o perfil 1 e perfil 7

## 5.3 – Velocidades Médias

Existem parâmetros que influenciam a apresentação dos resultados nas velocidades médias, designadamente, número de posições (foram medidas 12 posições no Perfil 1 e 16 Posições no Perfil 7) e profundidade do perfil (Perfil 1 tem 0,52 m de profundidade e Perfil 7 tem 0,98 m).

De forma a se estabelecer uma conformidade ao longo da verticalidade dos perfis foi usada a relação  $z/h$ , onde  $z$  representa a altura do perfil e  $h$  representa a altura piezométrica (Figura 5.14 e 5.15).

### 5.3.1 – Direcção Longitudinal

Tabela 5.1: Velocidades médias longitudinais – Perfil 1 e Perfil 7.

Velocidades Médias Longitudinais (m/s)			
Posição	Perfil 1	Posição	Perfil 7
1	0,04879	1	-0,00025
2	0,12458	2	0,00402
3	0,12402	3	-
4	0,12076	4	0,00032
5	0,12185	5	-0,00013
6	0,11577	6	-0,00010
7	0,10859	7	-0,00004
8	0,10868	8	0,00035
9	0,10173	9	0,00070
10	0,10105	10	0,00105
11	0,09804	11	-
12	0,09471	12	0,00494
		13	-
		14	0,00445
		15	-
		16	0,00845

Através da Tabela 5.1 e Figura 5.14 é possível observar que para o Perfil 1 as velocidades médias longitudinais obedecem ao padrão aceite no que diz respeito à variação da velocidade ao longo de um perfil sem vegetação (ver Capítulo 2.5), ou seja, existe uma diminuição progressiva da velocidade à medida que nos aproximamos do leito do rio.

Para o Perfil 7, tal não se verifica. A velocidade longitudinal tende a diminuir quando  $z/h$  se situa entre  $[0,9;0,8]$ , mantendo-se em valores praticamente iguais a zero, aumentando com maior amplitude para  $z/h = 0,3$ . Outro aspecto que pode ser observado é o facto de, no caso do Perfil 7, serem registados valores negativos para as velocidades médias obtidas.

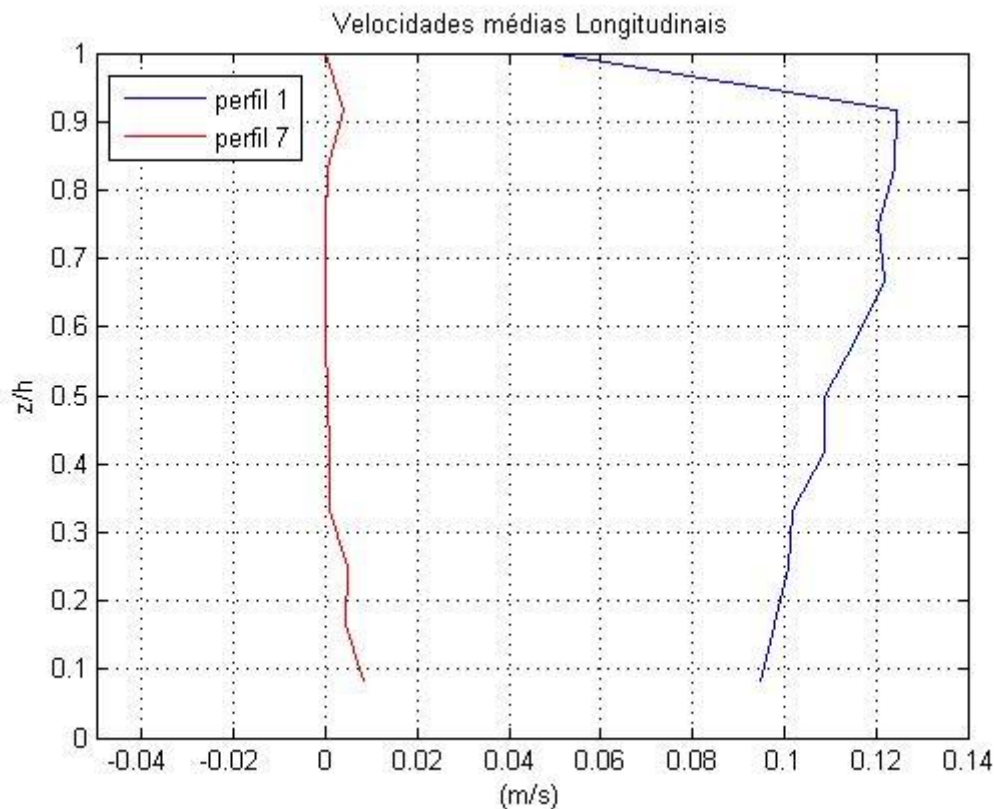


Figura 5.14: Comparação da velocidade média longitudinal entre o Perfil 1 e o Perfil 7.

Em ambos os perfis a velocidade obtida para a primeira posição medida (a que se situa mais próximo da superfície livre) é bastante mais baixa comparativamente com as restantes posições. A velocidade média longitudinal do Perfil 1 (sem vegetação) é superior à velocidade longitudinal média ao longo do Perfil 7 (com vegetação).

### .5.3.2 – Direcção Transversal

Tabela 5.2: Velocidades médias transversais – Perfil 1 e Perfil 7.

<b>Velocidades médias Transversais (m/s)</b>					
Perfil 1			Perfil 7		
Posição	Valores após filtragem	Valores absolutos	Posição	Valores após filtragem	Valores absolutos
1	0,0080	0,0094	1	4,977E-05	0,00015
2	0,0115	0,0145	2	-8,874E-04	0,00824
3	0,0303	0,0303	3	-	-
4	0,0286	0,0288	4	1,634E-04	0,00273
5	0,0147	0,0168	5	3,788E-05	0,00035
6	0,0114	0,0141	6	8,421E-06	0,00067
7	0,0025	0,0117	7	8,502E-05	0,00136
8	-0,0099	0,0138	8	2,622E-04	0,00151
9	-0,0085	0,0137	9	6,502E-05	0,00356
10	-0,0080	0,0134	10	1,035E-03	0,00270
11	-0,0136	0,0164	11	-	-
12	0,0099	0,0144	12	3,386E-03	0,00468
			13	-	-
			14	2,378E-03	0,00493
			15	-	-
			16	1,735E-02	0,02125

Através da Tabela 5.2 e Figura 5.15 é possível observar que para o Perfil 1 as velocidades médias transversais aumentam a partir da primeira posição até à 3ª posição no perfil. A partir daí existe uma diminuição brusca até meio do perfil, ou seja, quando  $z/h = 0,5$ . Finalmente, para a última metade do perfil os valores obtidos são relativamente constantes.

Para o Perfil 7 regista-se um comportamento diferente comparativamente ao Perfil 1 especialmente para a última posição medida. Neste perfil as velocidades médias transversais aumentam bruscamente da primeira para a segunda posição e diminuem da 2ª à 5ª posição. A partir daqui verifica-se um aumento gradual até à 14ª posição do perfil.

Quando  $z/h < 0.15$ , ou seja, para a última posição do perfil foi registado um aumento bastante considerável da velocidade média, na ordem dos 330% ( $\bar{v}(t)$  passou de 0,00493 m/s para 0,02125 m/s).

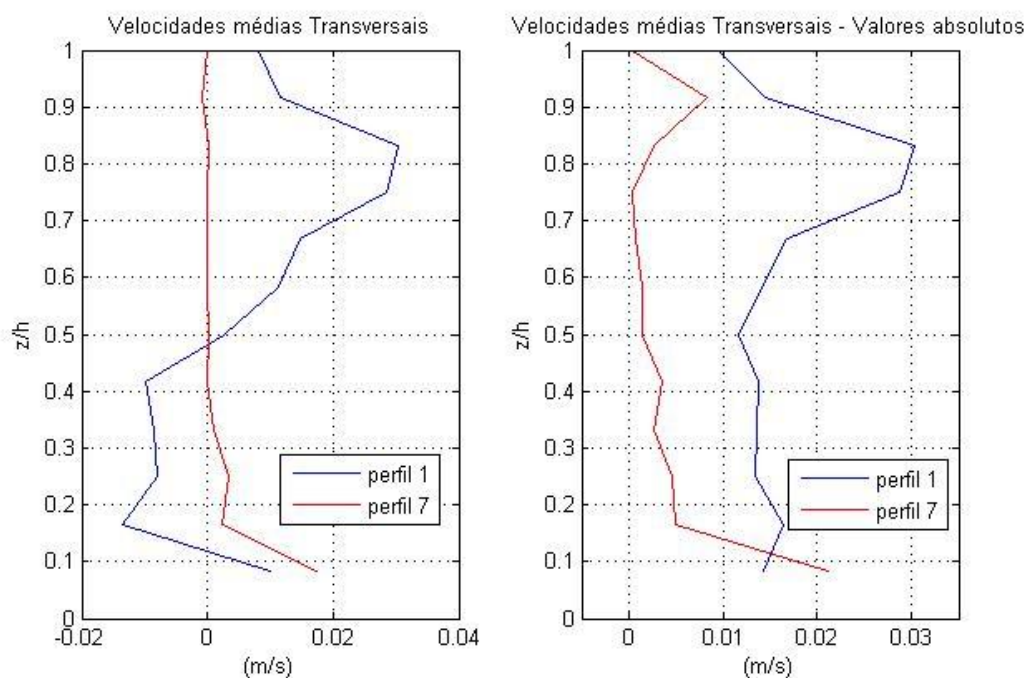


Figura 5.15: Comparação da velocidade média transversal entre o Perfil 1 e o Perfil 7.

Segundo a direcção transversal, tal como para a direcção longitudinal, a velocidade obtida para a primeira posição medida (a que se situa mais próximo da superfície livre) é mais baixa quando comparada com as restantes posições

em ambos os perfis. A velocidade transversal média do Perfil 1 é superior à velocidade transversal média ao longo do Perfil 7, facto que também se registou para a direcção longitudinal.

Após análise da Figura 5.15 e Tabela 5.2 verifica-se que, quando se trabalha utilizando os valores absolutos da velocidade média transversal (VMTA), os valores obtido são superiores aos calculados através da média simples pois não existe uma anulação entre os valores positivos e negativos da velocidade. Tal facto está de acordo com o raciocínio demonstrado no Capítulo 4.4 (ver Figura 4.1) e é observado especialmente no Perfil 1 onde os valores de VMTA são bastante superiores aos de VTM.

## 5.4 – Tensão de Reynolds

### 5.4.1 – Perfil 1

Tabela 5.3: Valor de Tensões de Reynolds ao longo do Perfil 1.

Perfil 1			
Posição	Tensão de Reynolds - VM		Tensão de Reynolds - VMTA
	$\overline{u' \cdot u'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-4}$	$\overline{u' \cdot v'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-4}$	$\overline{u' \cdot v'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-4}$
1	11,735	1,0408	1,234
2	6,414	0,0842	-0,071
3	5,836	0,4527	0,370
4	5,924	0,5542	0,421
5	5,850	0,3325	0,137
6	4,464	0,2364	0,020
7	4,508	0,1172	0,076
8	4,531	0,1143	0,081
9	4,313	0,5361	0,161
10	4,466	0,7044	0,204
11	4,873	0,7109	0,195
12	4,323	0,8441	0,540



VM – Foram usados os valores de Velocidade Média (m/s).

VMTA – Foram usados os valores absolutos de Velocidade média transversal (m/s).

Através das Figuras 5.16 e da Tabela 5.3 é possível observar a distribuição da tensão de Reynolds ao longo do Perfil 1. Ao se comparar com a velocidade média ao longo do Perfil 1 a tensão normal de Reynolds é consistente com as regiões onde existe um maior valor de velocidade longitudinal (Figura 5.14).

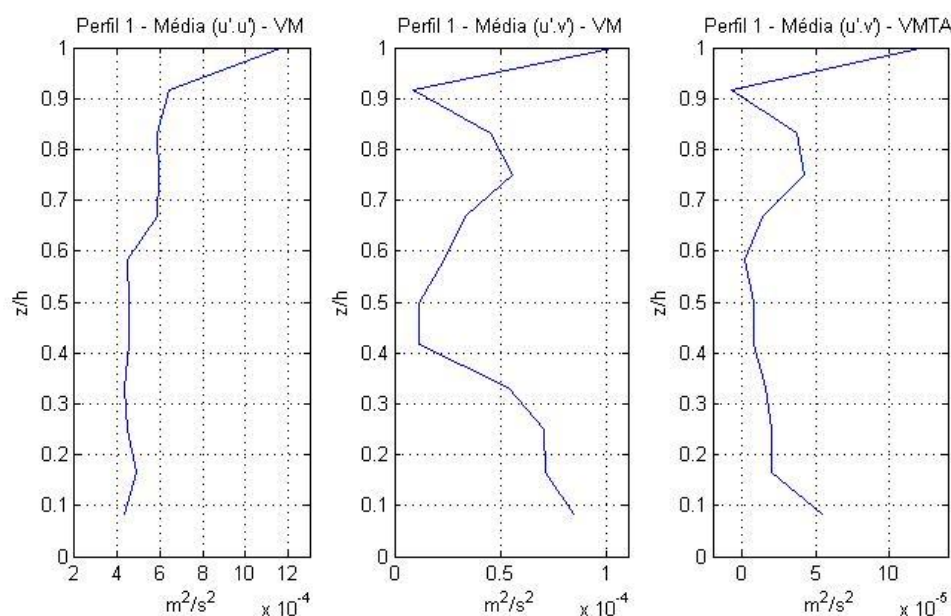


Figura 5.16: Tensão de Reynolds ao longo do Perfil 1.

No entanto, para a tensão tangencial de Reynolds não é possível estabelecer uma relação com a velocidade provavelmente devido à combinação da flutuação segundo uma componente longitudinal e transversal. É de realçar a semelhança na distribuição entre a tensão tangencial de Reynolds para VM e VMTA, particularmente para  $z/h$  entre  $[0,4;1,0]$ . Os valores obtidos da tensão Tangencial de Reynolds usando VM são superiores aos de VMTA, tal ocorrência está directamente relacionada com o facto do desvio padrão de VM no caso das velocidades transversais ser superior ao de VMTA (ver Equação 4.4) e, consequentemente, a tensão Reynolds.

### 5.4.2 – Perfil 7

Tabela 5.4: Valor de Tensões de Reynolds ao longo do Perfil 7.

Perfil 7			
Posição	Tensão de Reynolds - VM		Tensão de Reynolds - VMTA
	$\overline{u' \cdot u'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-4}$	$\overline{u' \cdot v'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-4}$	$\overline{u' \cdot v'} (\text{m}^2/\text{s}^2) \times 10^{-5}$
1	0,0057	0,0062	0,0028
2	17,9415	-42,6201	-16,8209
3	-	-	-
4	1,9511	1,9531	0,9145
5	0,0349	0,0015	0,0023
6	0,0400	0,0014	-0,0028
7	0,2861	0,3580	0,1914
8	0,4607	0,8102	0,4560
9	0,2886	-0,3311	-0,1843
10	0,7150	1,4214	0,8982
11	-	-	-
12	2,4746	4,8314	2,8732
13	-	-	-
14	2,3028	3,2659	2,3001
15	-	-	-
16	4,9059	15,3137	3,8621

VM – Foram usados os valores de velocidade média (m/s).

VMTA – Foram usados os valores absolutos de velocidade média transversal (m/s).

Através das Figuras 5.17 e da Tabela 5.4 é possível observar a distribuição da tensão de Reynolds ao longo do Perfil 7. Ao se comparar com a velocidade média ao longo do Perfil 7 a tensão normal de Reynolds é consistente com as regiões onde existe um maior valor de velocidade longitudinal (Figura 5.22), tal como se verificou para o Perfil 1.

Relativamente à tensão tangencial de Reynolds, ao contrário do que acontece para o Perfil 1, é possível estabelecer uma analogia com as velocidades médias longitudinais e transversais. Esta analogia está directamente relacionada com o facto da velocidade média longitudinal e transversal ser relativamente constante ao longo do Perfil 7 (excepto na última posição). A única posição onde tal não se verifica, é a posição 2 ( $z/h = 0.9$ ), onde é registado um aumento brusco da tensão tangencial de Reynolds.

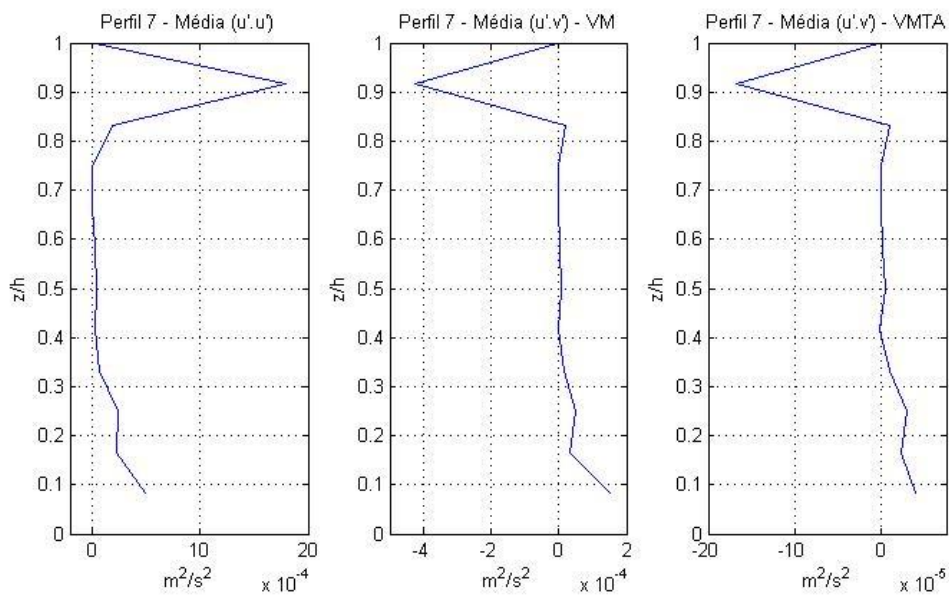


Figura 5.17: Tensão de Reynolds ao longo do Perfil 7.

É de realçar a enorme semelhança na distribuição entre a tensão tangencial de Reynolds para VM e VMTA ao longo de todo o Perfil 7. Os valores obtidos da tensão Tangencial de Reynolds usando VM são superiores aos de VMTA, pois o desvio padrão de VM no caso das velocidades transversais é superior ao de VMTA (ver Equação 4.4) e, conseqüentemente, a tensão Reynolds. Ao se comparar a Figura 5.17 (tensão de Reynolds com vegetação) com a Figura 5.16 (tensão de Reynolds sem vegetação), é possível

observar que, quando existe vegetação os valores da tensão de Reynolds são inferiores. Tal facto está directamente relacionado com a vegetação impedir a criação de turbulência, originando valores de tensões de Reynolds praticamente nulos.

## 5.5 – Análise de Quadrantes

### 5.5.1 – Perfil 1 – VM

O valor de  $H$  foi adoptado como sendo igual a 0.8, excepto para a primeira posição do Perfil 1 onde  $H = 4$ . Para a primeira posição, para valores de  $H$  entre 0.5 e 2.5 o 1º Quadrante assume uma preponderância na sua contribuição comparativamente aos restantes quadrantes.

VM – Foram usados os valores de Velocidade Média (m/s).

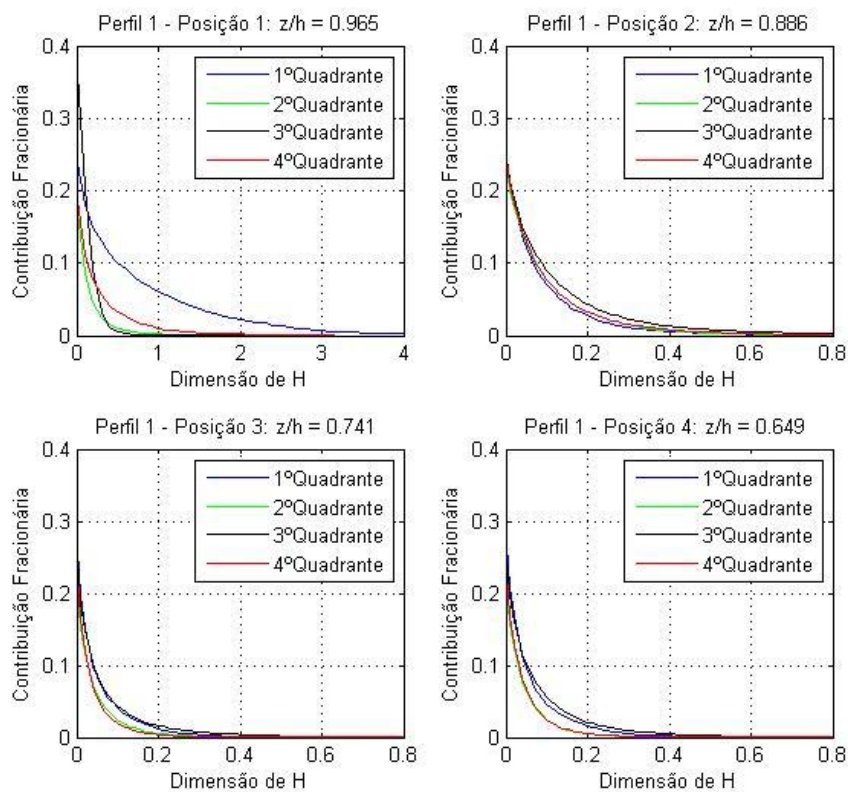


Figura 5.18: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 1 – Posições 1 a 4.

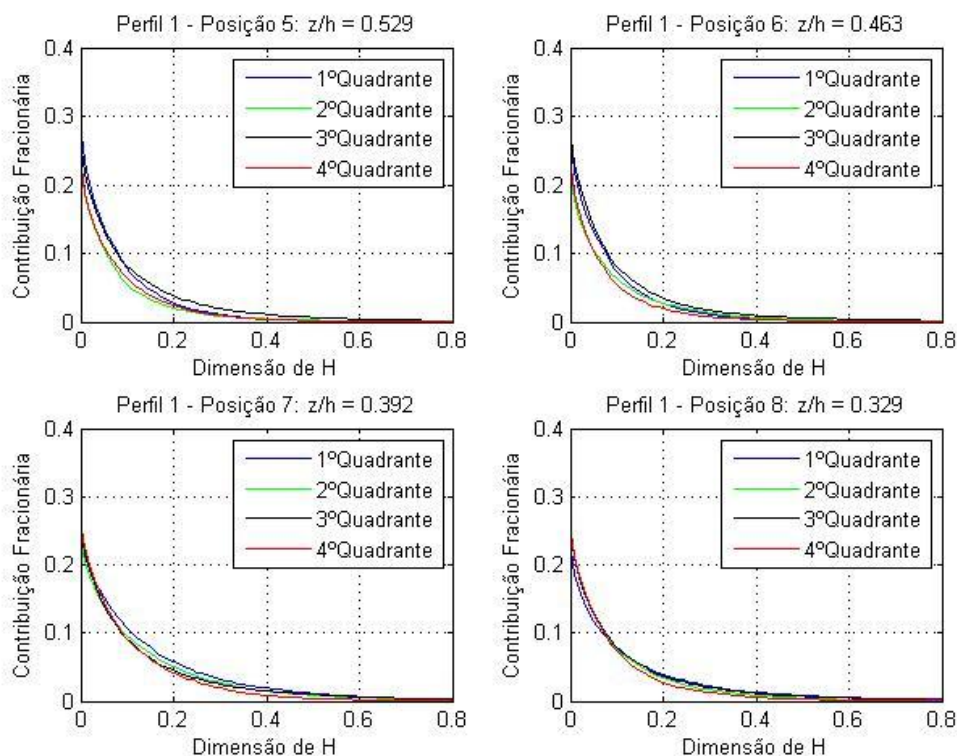


Figura 5.19: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 1 – Posições 5 a 8.

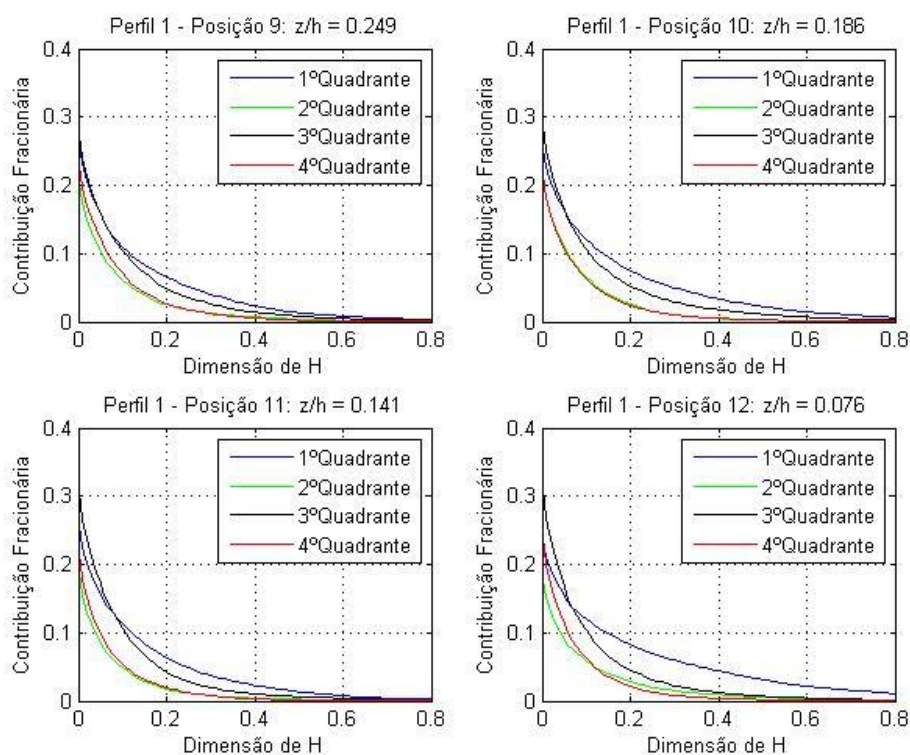


Figura 5.20: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 1 – Posições 9 a 12.

Entre a 2ª e a 8ª posição existe um aparente equilíbrio entre os 4 quadrantes (nas posições 3 e 4 os quadrantes 1 e 3 têm uma ligeira predominância). No entanto, à medida que nos aproximamos do leito do rio verifica-se um aumento da importância do 1º e 3º Quadrante.

### 5.5.2 – Perfil 1 – VMTA

Desde logo, é possível observar algumas semelhanças entre os resultados obtidos para VM e VMTA: O valor de  $H$  adoptado é 0.8, excepto para a primeira posição do Perfil 1 onde  $H = 4$  e na primeira posição do Perfil 1, para valores de  $H$  entre 0.5 e 2.5 o 1º Quadrante assume uma preponderância na sua contribuição comparativamente aos restantes quadrantes.

VMTA – Foram usados os valores absolutos de Velocidade média transversal (m/s).

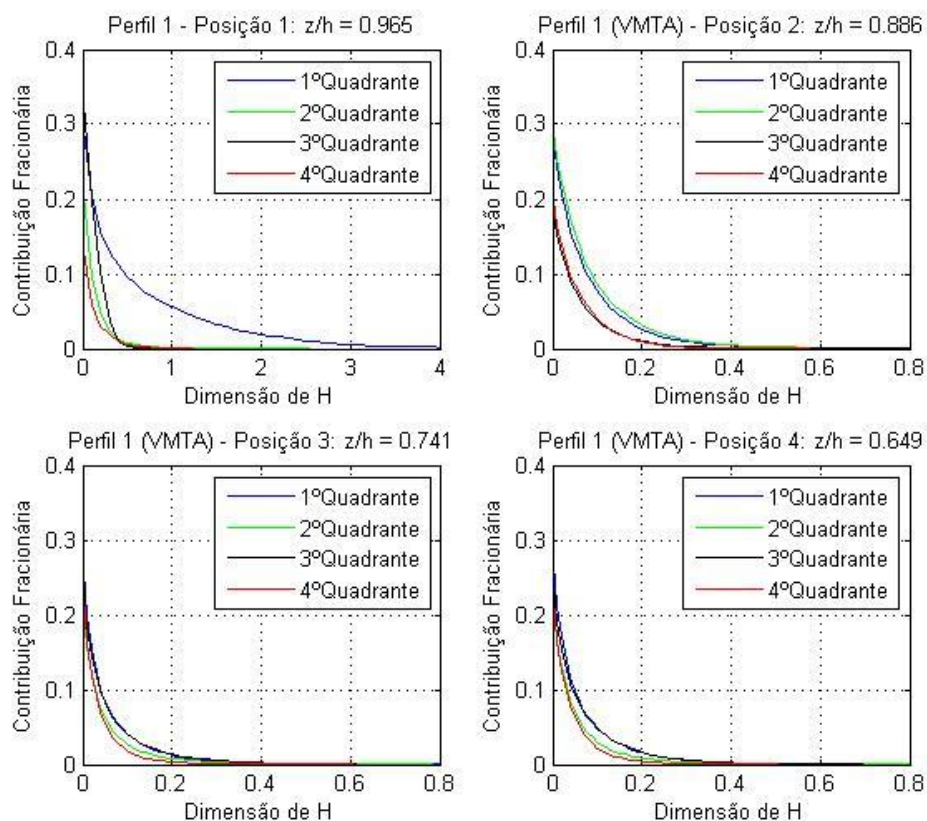


Figura 5.21: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 1 – Posições 1 a 4.



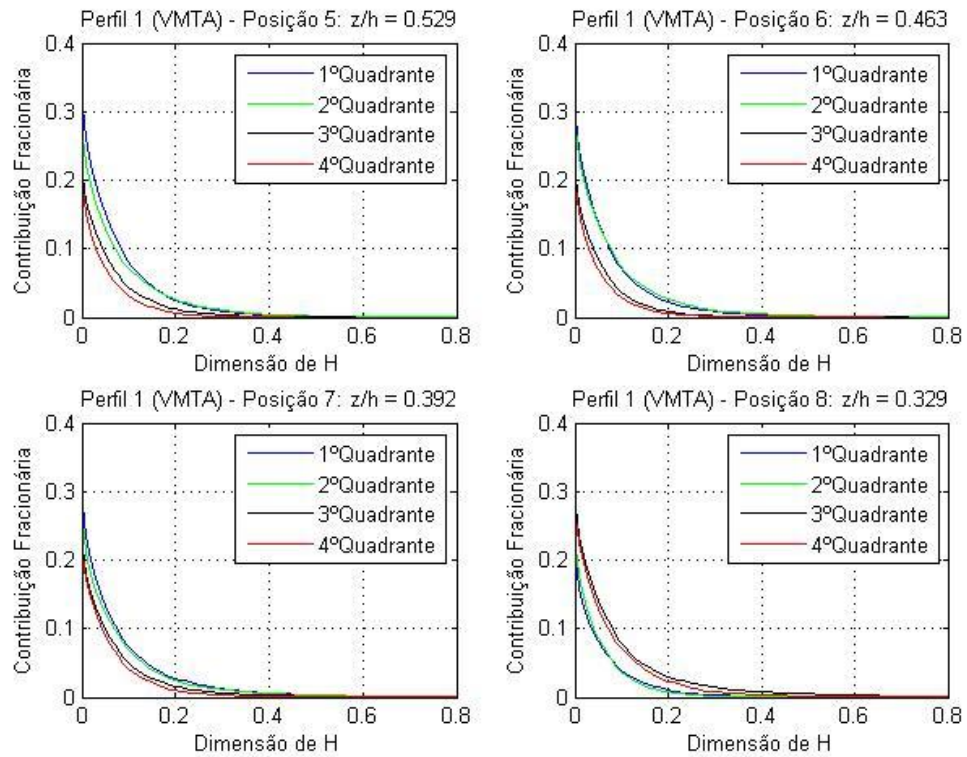


Figura 5.22: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 1 – Posições 5 a 8.

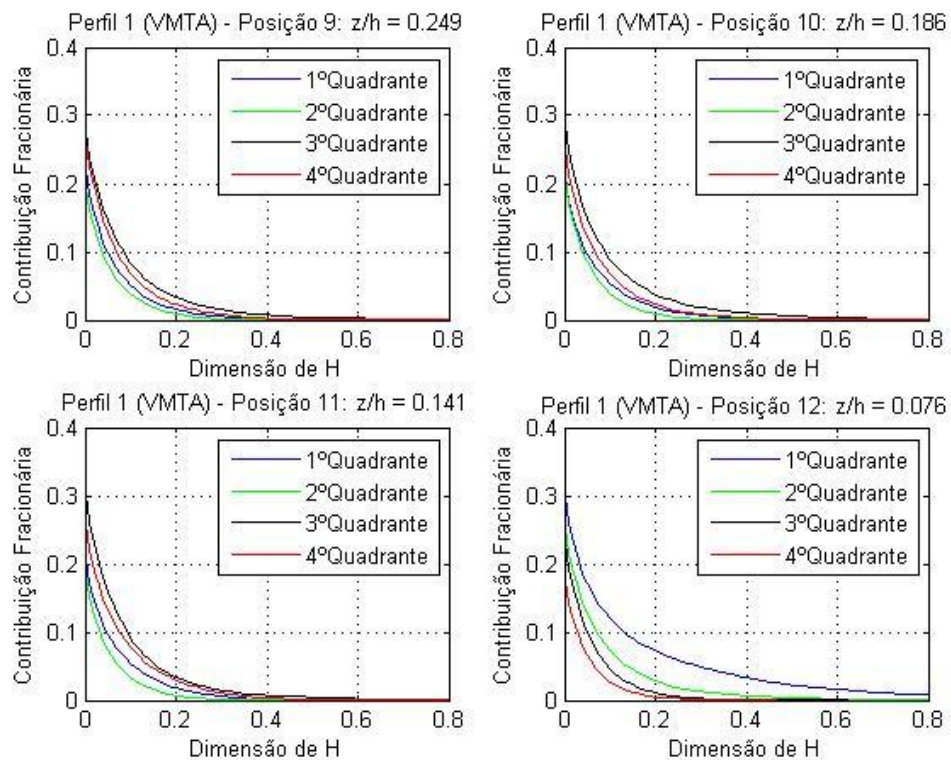


Figura 5.23: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 1 – Posições 9 a 12.

Para as posições 5, 6 e 7 os quadrantes com maior influência são o 1º e o 2º Quadrante ( $v' > 0$ ). A partir da 8ª posição, os quadrantes 3 e 4 ( $v' < 0$ ) têm maior preponderância. Finalmente, na última posição do Perfil 1, o 1º e o 2º Quadrante voltam a ser os que têm maior peso no fenómeno bursting.

### 5.5.3 – Perfil 7 – VM

O valor de  $H$  adoptado é de 4 para todas as posições do Perfil 7. O 1º e 3º Quadrante são os quadrantes que têm maior contribuição na maioria das posições analisadas. Esta contribuição verifica-se ao longo de todo o perfil, designadamente, junto à superfície (posição 1) e na vegetação (posições 4, 7 e 8). A partir da posição 10 (vegetação) até à posição 14 o 1º Quadrante torna-se ainda mais predominante. Junto ao leito do rio (posição 16) para  $H > 0.6$  o 3º Quadrante é aquele que contribui mais para o fenómeno bursting.

VM – Foram usados os valores de Velocidade Média (m/s).

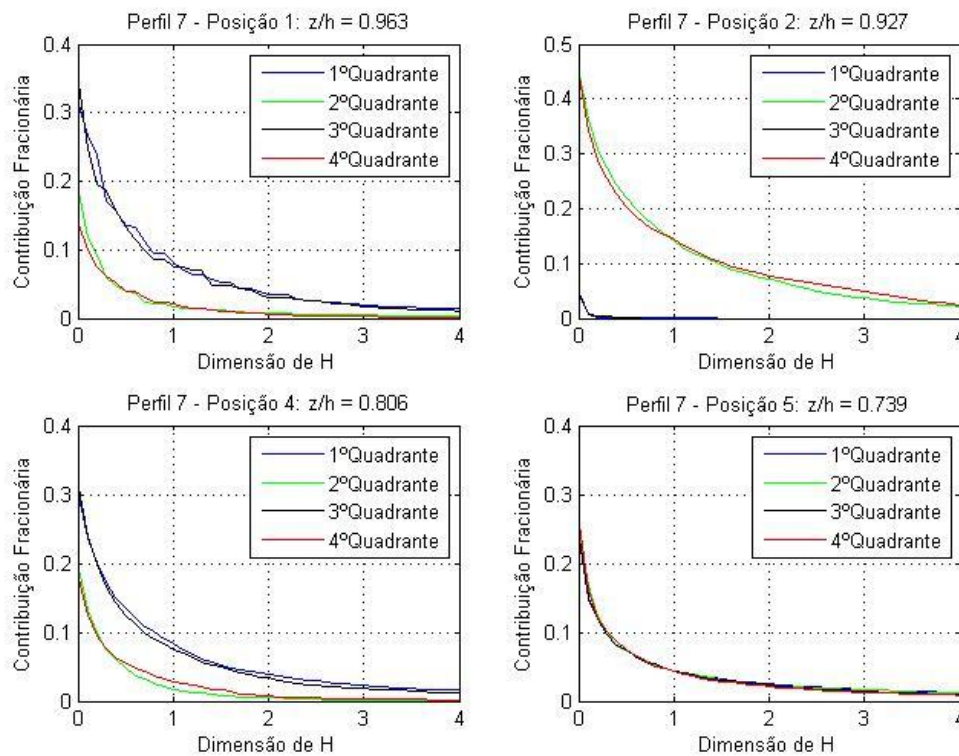


Figura 5.24: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 7 – Posição 1,2,4,5.



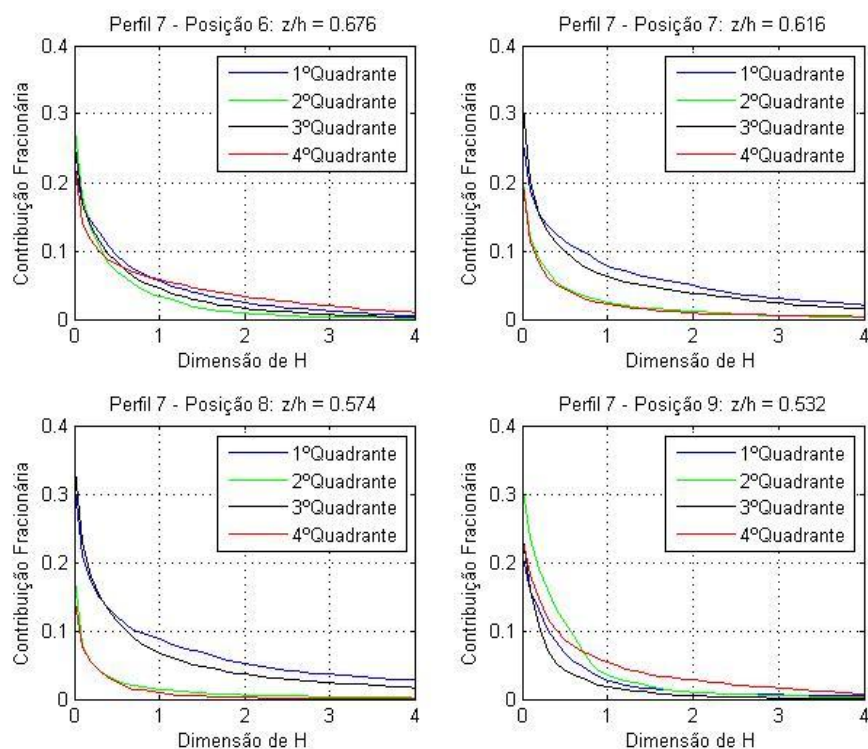


Figura 5.25: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 7 – Posição 6,7,8,9.

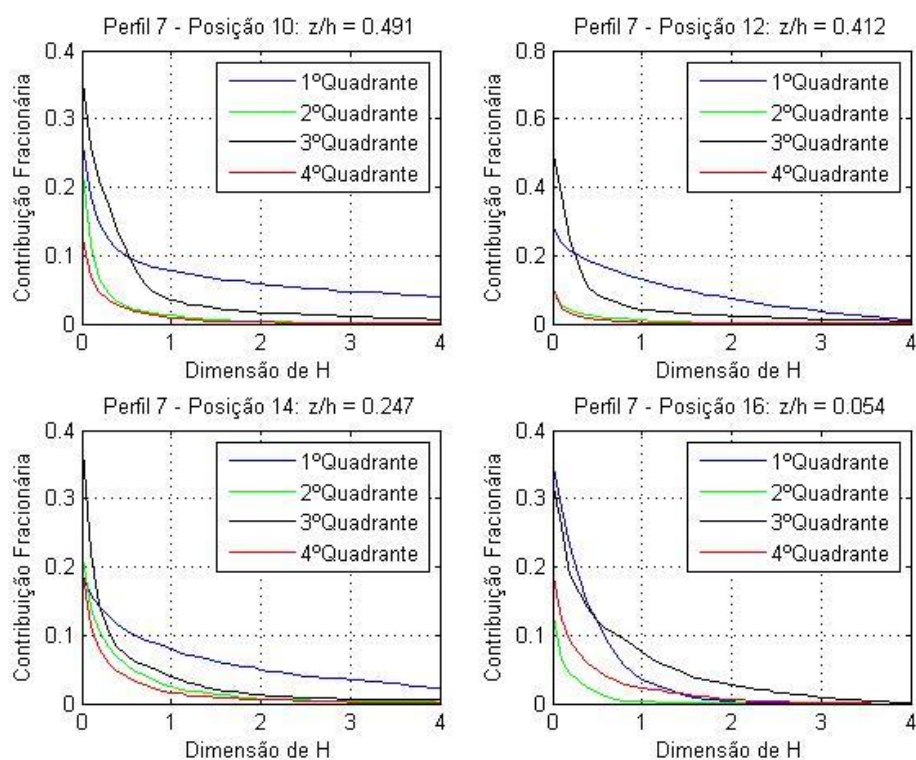


Figura 5.26: Análise de Quadrantes (VM) – Perfil 7 – Posição 10,12,14,16.

Para a posição 2 (vegetação) o somatório da interferência do 2º e 4º Quadrante é de praticamente 100%. Nas restantes posições existe um equilíbrio aparente na influência de cada quadrante no fenómeno bursting. A única excepção situa-se na posição 9, onde para valores de  $H < 0.6$  é possível identificar o 2º Quadrante como sendo o quadrante com maior peso na análise de Quadrantes.

#### 5.5.4 – Perfil 7 – VMTA

O valor de  $H$  adoptado é de 4 para todas as posições do Perfil 7, excepto para a última (posição 16 – junto ao leito do rio) onde  $H$  igual a 2.

Tal como para a análise de Quadrantes efectuada no Perfil 7 – VM (Capítulo 5.3) o 1º e 3º Quadrante são os que têm maior contribuição na maioria das posições analisadas, especialmente o 1º Quadrante. Esta influência regista-se na posição 1 (junto à superfície livre), posições 3, 7 e 8 (vegetação). A partir da posição 10 até à posição 16 o 1º Quadrante torna-se predominante para valores de  $H > 0.25$ .

VMTA – Foram usados os valores absolutos de Velocidade média transversal.

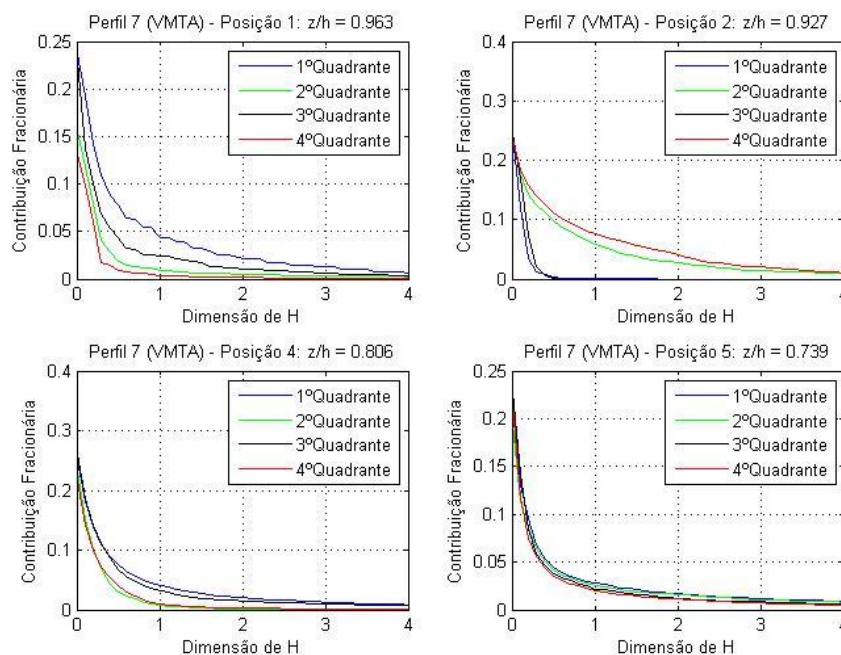


Figura 5.27: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 7 – Posição 1,2,4,5.

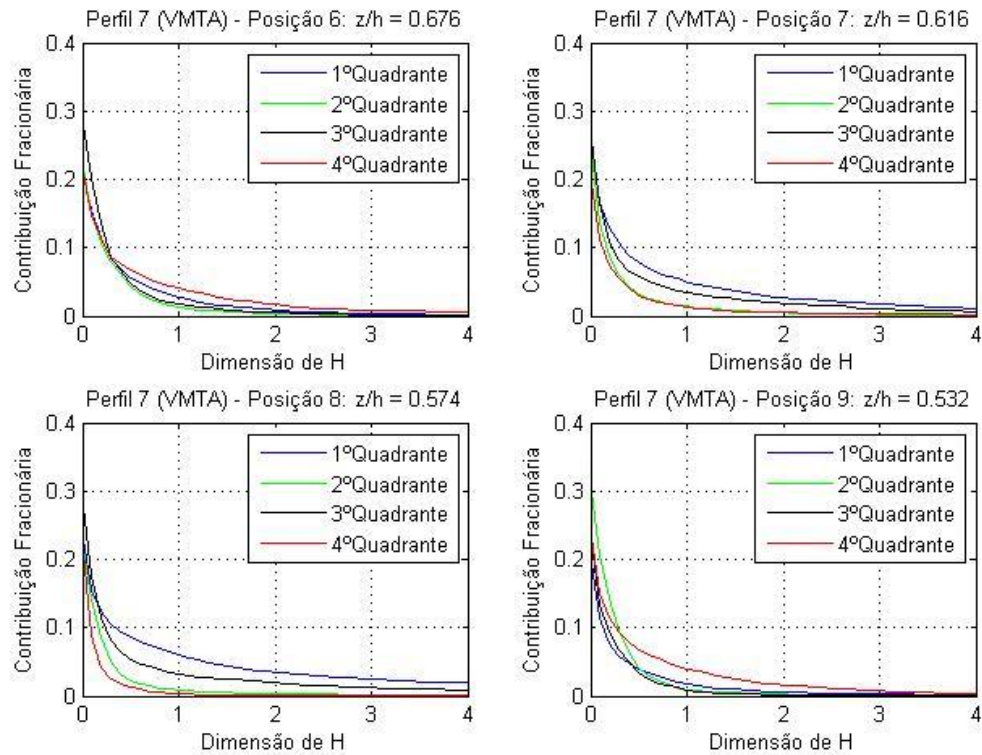


Figura 5.28: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 7 – Posição 6,7,8,9.

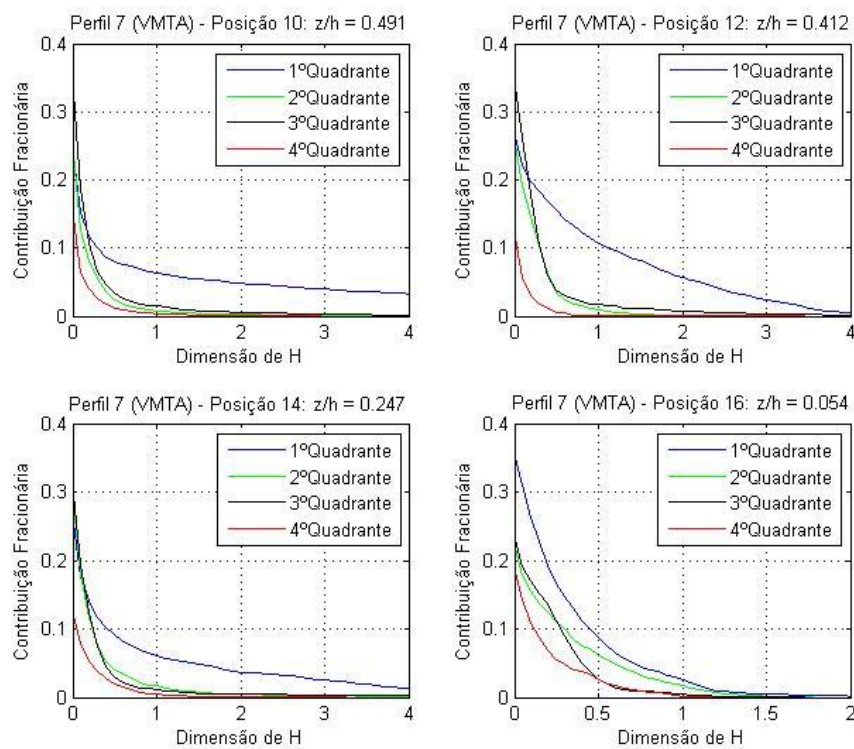


Figura 5.29: Análise de Quadrantes (VMTA) – Perfil 7 – Posição 10,12,14,16.

Outra semelhança entre a análise de quadrantes deste perfil para VM e VMTA ocorre na posição 2 (vegetação) onde o somatório da intervenção do 2º e 4º Quadrante é de praticamente 100% para  $H > 0.5$ . Na posição 9 o 2º e 4º Quadrante são os que têm maior peso para a contribuição do fenómeno bursting.

# Capítulo 6

## Conclusões e trabalho futuro

Nesta dissertação pretendeu-se caracterizar estruturas coerentes em leitos vegetados. O trabalho de campo consistiu em medir as velocidades instantâneas longitudinais, transversais e verticais ao longo de 10 perfis (2 sem vegetação, 8 com vegetação), através de um 3-D Acoustic Doppler Velocimetry (Nortek ADV-Vectrino™). Destes 10 perfis foram escolhidos 2: Perfil 1 – sem vegetação e Perfil 7 – com vegetação.

Os dados obtidos relativamente às velocidades instantâneas verticais não foram utilizados devido ao excesso de ruído presente, pelo que os cálculos efectuados nesta dissertação dizem respeito à componente longitudinal e transversal do escoamento, ou seja, o trabalho foi efectuado num plano horizontal. As velocidades instantâneas foram filtradas, foram calculadas velocidades médias, tensões de Reynolds e, finalmente, foi efectuada uma análise de quadrantes.

Os cálculos realizados na obtenção da velocidade média foram efectuados tendo em conta o facto de se estar a trabalhar num plano horizontal, sendo utilizados 2 tipos de velocidades médias transversais: i) VM – Velocidade média, calculada através da média dos valores de velocidades instantânea filtrados; ii) VMTA – Velocidade média transversal absoluta, calculada através da média absoluta dos valores de velocidade instantâneas filtrados. O facto de se trabalhar com VM e VMTA permitiu obter as seguintes conclusões:

- Perfil 1 e 7 (VM e VMTA) – A tensão normal de Reynolds é consistente com a distribuição de velocidade longitudinal;
- Perfil 1 e 7 (VM e VMTA) – A tensão tangencial de Reynolds é coerente com a distribuição de velocidade transversal e longitudinal para o Perfil 7, mas não o é para o Perfil 1;
- Perfil 1 e 7 – Os valores obtidos para a tensão tangencial de Reynolds segundo VM são superiores aos obtidos através de VMTA.

Relativamente à análise de Quadrantes, pode-se concluir que os Quadrantes com predominância no fenómeno bursting são:

- Perfil 1 (VM) – 1º e 3º Quadrante;
- Perfil 1 (VMTA) – 1º e 2º Quadrante, embora a sua contribuição, de uma forma geral não seja muito superior à do 3º e 4º Quadrante;
- Perfil 7 (VM) – 1º e 3º Quadrante;
- Perfil 7 (VMTA) – 1º e 3º Quadrante (para posições junto ao leito do rio e valores de  $H > 0.5$  a contribuição do 2º Quadrante seja superior à do 3º Quadrante);
- Ao contrário do que se observa na análise de quadrantes segundo uma direcção longitudinal e vertical ao escoamento, para esta dissertação os quadrantes com maior peso são o 1º e o 3º. Pode-se assim concluir que a contribuição dos quadrantes na análise de Quadrantes está dependente do plano onde se faz a análise dos mesmos (vertical ou horizontal).

Outro factor a ter conta nos resultados obtidos está relacionado com a continuidade dos dados considerados úteis. Através das Tabelas 4.7 e 4.8 constata-se que, em determinadas posições do perfil, existem vários intervalos de dados utilizados.

O fenómeno bursting implica uma sequência de eventos, pelo que, ao se quebrar a continuidade dos dados, está-se a quebrar a própria sequência de eventos. Neste trabalho optou-se por privilegiar a qualidade dos dados obtidos em detrimento da duração de cada intervalo pois como a duração de um evento anda na ordem das décimas de segundo (baseado em Ferreira et al. 2009 - Figura 1) considerou-se que, por exemplo, um intervalo de aproximadamente 4 segundos é suficiente para ser completada a sequência de eventos que

compõem o fenómeno bursting (o intervalo de dados úteis contínuos com menor duração tem 3.92 segundos e pertence ao perfil 7, posição 9 segundo uma direcção transversal).

Devem ser elaborados estudos complementares para dar seguimento e acréscimo de conhecimento sobre esta temática. Assim sendo, na linha do presente trabalho seria recomendável ter em conta os seguintes aspectos:

- A quantidade de plantas influencia a qualidade dos dados obtidos. Quanto maior for, maior a probabilidade de os dados terem ruído. Por este motivo, a data escolhida para se efectuar o trabalho de campo é bastante importante, pois a partir de Abril começa o processo de eutrofização o que aumenta a quantidade, tamanho e densidade da vegetação.
- Caso a vegetação do seja demasiado densa, devem ser retiradas algumas plantas do local onde se vai analisar o Perfil. É preferível alterar ligeiramente e provisoriamente o ecossistema e obter dados considerados válidos em 3 dimensões (de modo a utilizar todo o potencial do Doppler), a não proceder a qualquer alteração e obter dados inúteis.

Os resultados alcançados nesta dissertação e metodologia seguida podem ser usados para posterior investigação ou estudos de modelação numérica.



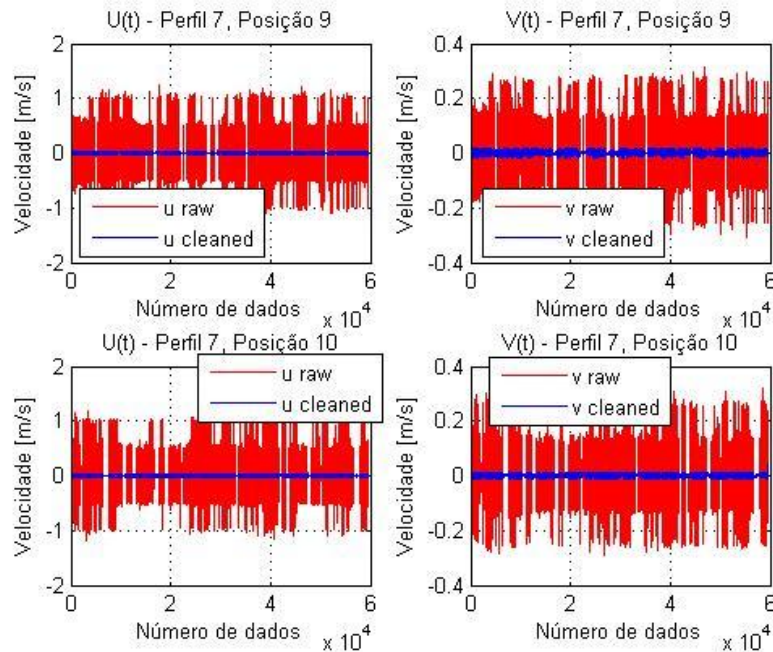


# Bibliografia

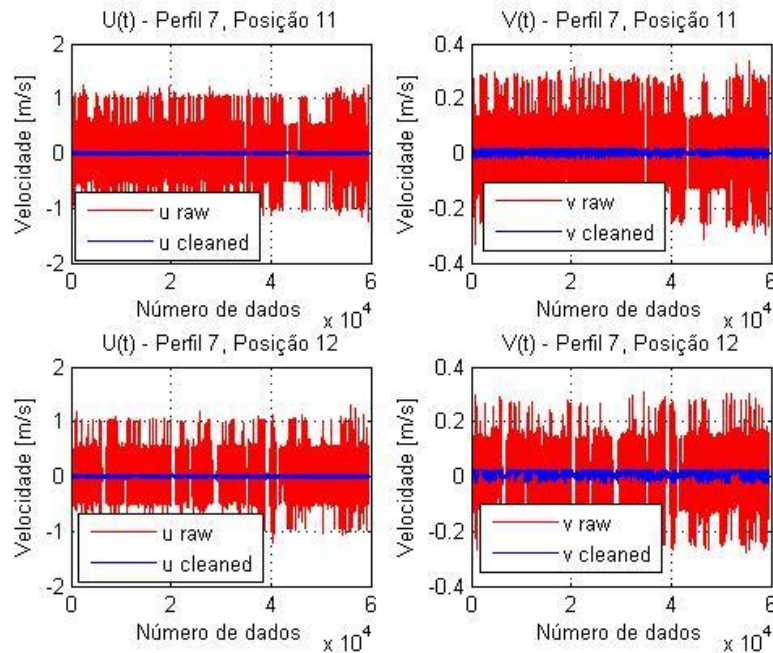
- Blackwelder, R.F. 1987. Coherent structures associated with turbulent transport, Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Transport Phenomena In Turbulent Flow, Tokyo: 1-20.
- Ferreira, R. M. L., Franca, M.F., Leal, J.G.B., e Cardoso A.H., Organised turbulence over mobile and immobile hydraulically rough boundaries (2009).
- Ferreira, R. M. L. (2005), River Morphodynamics and Sediment Transport. Conceptual Model and Solutions. Ph.D. thesis, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Franca, M. J., Ferreira R. M. L., Lemmin, U. (2008). Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows. *Adv. Water Resour.* 31(8): 915-925.
- Goring D.G. & Nikora V.I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data.
- Kadlec, R. H. (1990). Overland flow in wetlands: Vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(5), 691–705.
- Lacey, R.W.J., and A.G. Roy (2007). A comparative study of the turbulent flow field with and without a pebble cluster in a gravel-bed river. *Water Resour. Res.*, 43(5): W05502.
- Lory J.P.S., Estudo laboratorial de escoamentos em leitos com vegetação emersa e rígida (2011).
- Miler, O., Albayrak, I., Nikora, V., O'Hare, M., & Crane, T. (2010). Biomechanics of aquatic plants and its role in flow-vegetation interactions. *RiverFlow 2008*, Braunschweig, Germany.
- Nepf, H.M. (2012). Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2012. 44:123-42.

- Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, vol. Monograph Series. Balkema, Rotterdam: International Association for Hydraulic Research.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I. & Griffiths, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(2), 123–133.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. & Walters, R. (2007a). Double-averaging concepts for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8), 873–883.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge.
- Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy. *Boundary Layer Meteorol.*, 78: 351-382.
- Ricardo, A.M.C. (2008). Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. Aplicação ao estudo da resistência hidráulica.
- Saggiori S., Rita S., Ferreira R.M.L. & Franca M., Analysis of 3rd Order moments on a natural vegetated flow (2011).
- Sukholodova, T.A. and Sukhodolov, A.N. (2012). Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants:1. Theory and field experiments. *Water Resour. Res.*, 48: W10533.
- Tanino, Y. & Nepf, H. M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(1), 34–41.
- Yen, B. C. (2002). Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(1), 20–39.

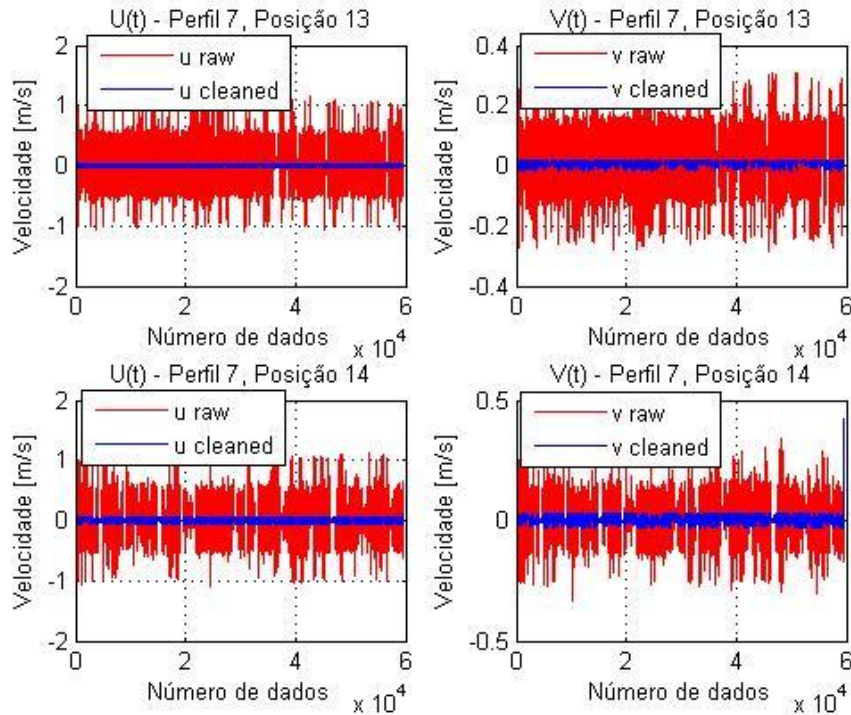
# Anexo I



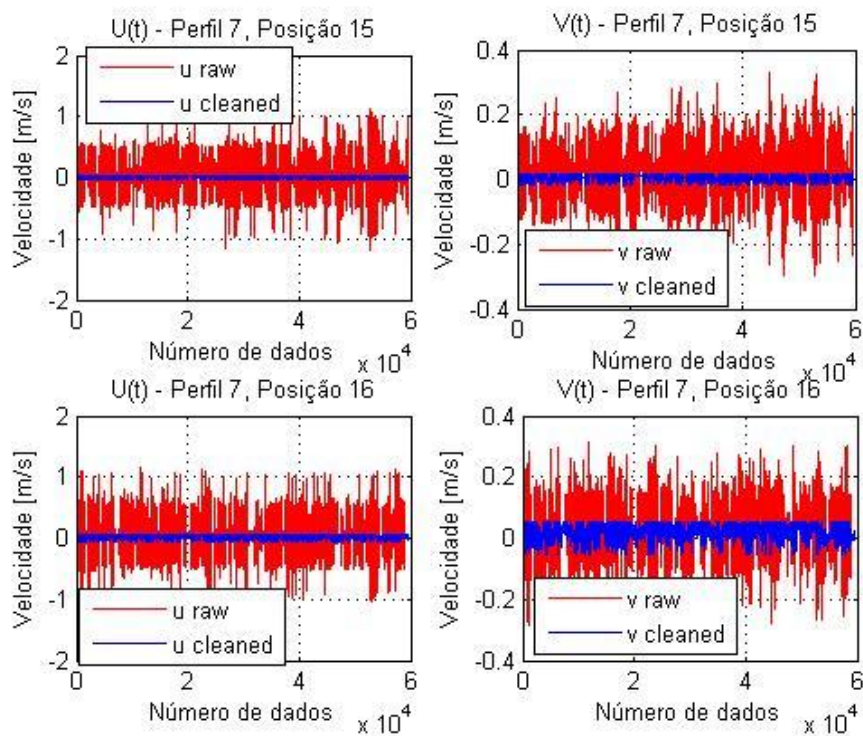
Perfil 7, Posição 9 e 10 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais –  
Filtragem inicial de dados.



Perfil 7, Posição 11 e 12 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais –  
Filtragem inicial de dados.

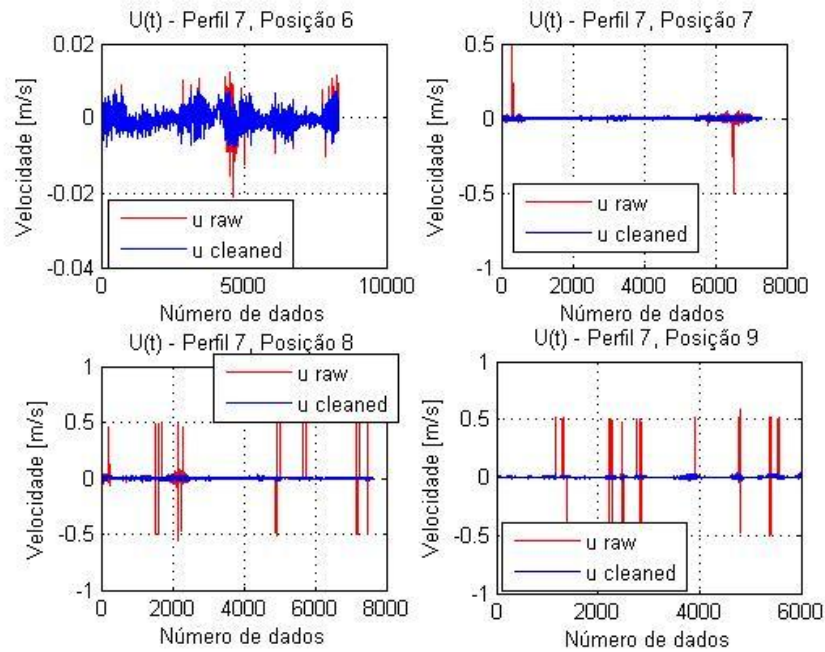


Perfil 7, Posição 13 e 14 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais –  
Filtragem inicial de dados.

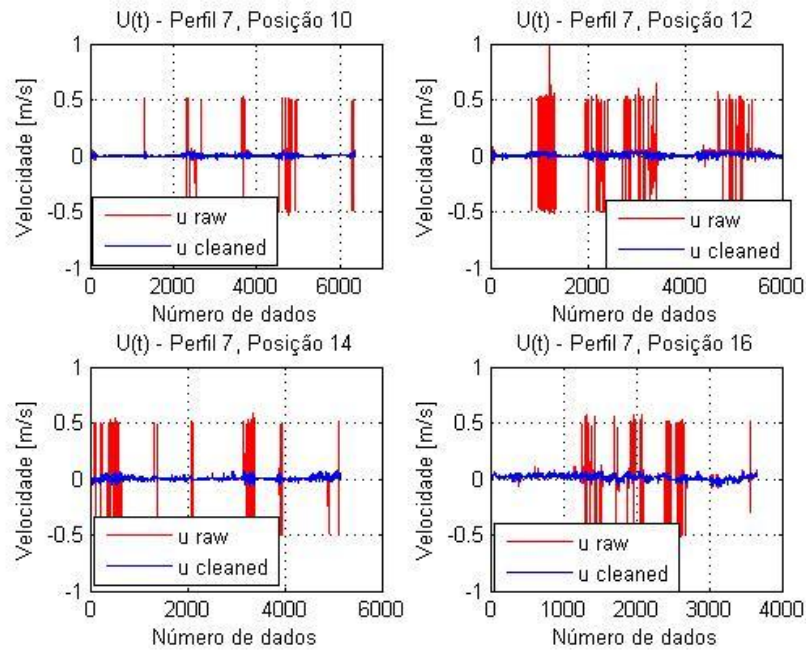


Perfil 7, Posição 15 e 16 – Velocidades instantâneas longitudinais e transversais –  
Filtragem inicial de dados.

## Anexo II

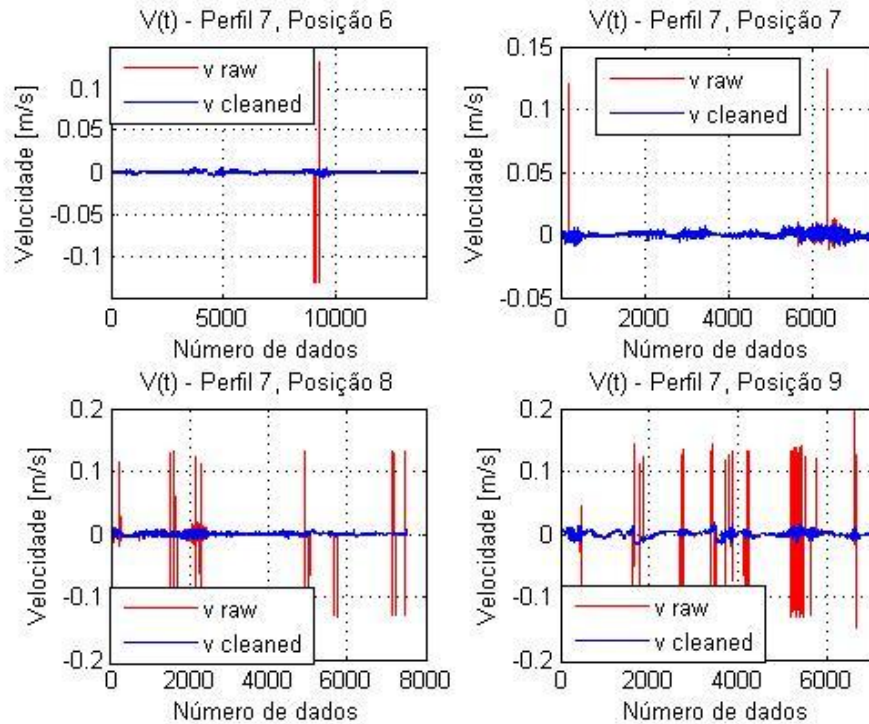


Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados  
– Perfil 7, Posição 6, 7, 8 e 9

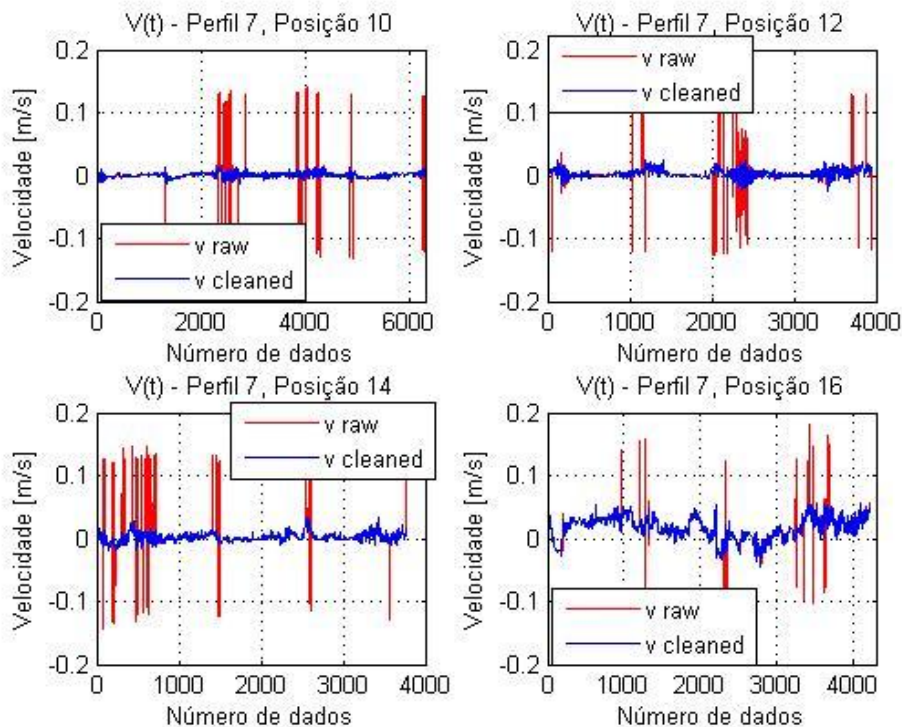


Velocidade longitudinal – comparação entre  $u(t)$  inicial e  $u(t)$  após Filtragem de dados  
– Perfil 7, Posição 10, 12, 14 e 16





Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados –  
Perfil 7, Posição 6, 7, 8 e 9



Velocidade transversal – comparação entre  $v(t)$  inicial e  $v(t)$  após Filtragem de dados –  
Perfil 7, Posição 10, 12, 14 e 16